



Tielaitos

Päällystetutkatutkimukset 1996-1997

1.1.1996 - 31.12.1997



**Tielaitoksen
selvityksiä**

4/1998

Rovaniemi 1998

TIEHALLINTO
Lapin tiepiiri

Tielaitoksen selvityksiä
4/1998

Päällystetutkatutkimukset 1996-1997

Tielaitos
TIEHALLINTO
Lapin tiepiiri

Rovaniemi 1998

ISBN 951-726-407-0
ISSN 0788-3722
Oy Edita Ab
Helsinki 1998

Tielaitos
TIEHALLINTO
Lapin tiepiiri
Hallituskatu 1-3
PL 194
96101 ROVANIEMI
Puhelinvaihte 0204 44 159

Aiheluokka: 42

Asiasanat: päälyste, laaduvalvonta, dielektrisyys, tyhjätila, paksuus

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää päälystetutkan käyttömahdollisuuksia uusien päälysteiden laadunvalvonnassa. Tutkimukset tehtiin vuosina 1996-1997. Erityisesti keskityttiin päälysteen tyhjätilan määrittämiseen. Toisena tutkimuskohteena oli päälysteen paksuuden mittaaminen päälystetutkan avulla.

Päälystetutkan avulla voidaan mitata päälysteen dielektrisyyttä. Dielektrisyys on materiaalin yksi sähköisistä ominaisuuksista, joka on materiaalille ominainen vakio ja dimensioton suure. Tiivistettäessä päälystettä ilman suhteellinen osuus päälysteessä pienenee, jolloin päälysteen dielektrisyys puolestaan kasvaa. Paksuuden määrittämiseen tarvitaan dielektrisyiden lisäksi päälystetutkalla lähetetyn sähkömagneettisen pulssin kulkuaika päälysteen pinnasta päälysteen pohjaan.

Päälystetutkana käytettiin SIR 10H -laitteistoa ja 1 GHz:n kartiotorviantennia. Päälystetutkalla dielektrisyyksien määrittämiseen käytettiin heijastustekniikkaa, jossa dielektrisyydet lasketaan rajapinnoista tapahtuvien heijastusten amplitudien suuruuksien perusteella. Mittaukset voidaan tehdä päälystetutkalla 50-70 km/h nopeudella ja yksi mittausta kattaa noin 300 x 300 mm² kokoisen alueen. Laboratoriossa pääasiallisena tutkimusvälineenä käytettiin dielektrisyyssondia. Sondilla mittausta perustuu kapasitanssin muutoksiin tutkittavassa materiaalissa.

Tutkimuksessa tehtiin laboratorio- sekä kenttämittauksia. Laboratoriotutkimuksissa keskityttiin tyhjätilan ja dielektrisyiden välisen teorian toimivuuden selvittämiseen. Kenttätutkimuksissa tavoitteena oli selvittää mittausten toimivuus työmaolosuhteissa. Pääasiallisena vertailumenetelmänä kenttämittauksissa käytettiin poranäytteitä.

Laboratoriossa tehtyjen koekappale- ja koelaattamittausten perusteella voitiin todeta, että tyhjätilan ja dielektrisyiden välillä on selvä riippuvuus. Lisäksi voitiin todeta, etteivät normaalit (alle $\pm 0,5$ prosentin) sideainepitoisuuden vaihtelut vaikuta päälysteen dielektrisyyteen. Lähtökohtana pidettyä Timo Saarenkedon aloitteessaan esittämää teoriaa voidaan siis pitää oikeana ja toimivana. Laboratoriossa määritettyä keskimääräistä yhtälöä käytettiin kenttämittauksissa tyhjätilojen laskemiseen.

Kenttämittauksissa poranäyte- ja tutkatulosten välinen korrelaatio oli vahva sekä tyhjätila- että paksuusmittauksissa. Keskivirhe tyhjätilamäärittäyksissä oli 0,9 prosenttiyksikköä. Paksuusmittauksissa sekä sidotulla että sitomattomalla alustalla keskivirhe oli 4 mm. Päälystetutka soveltuu siis tulosten perusteella hyvin päälysteen tyhjätila- ja paksuusmittauksiin.

Tutkamittausten selvä etu muihin menetelmiin on tulosten kattavuus. Tulokset saadaan koko kohteesta puolen metrin välein. Mittaus on nopea tehdä, mikä mahdollistaa pituussuunnassa useamman linja mittaamisen kustannusten kohoamatta merkittävästi.

ABSTRACT

The aim of the study was to examine how the ground penetrating radar (GPR) technique with 1 GHz air horn antenna can be used in pavements quality control surveys. The studies were performed in 1996-1997. The main question was if GPR could be used for measurements of air voids content and thickness of newly asphalted pavement.

Ground penetrating radar pulse propagation is based on dielectric properties of the medium studied. Measuring voids content by dielectric value is based on the fact that the dielectric value of the asphalt pavement is a function of volumetric proportions of dielectric values of its own components. Compacting of asphalt reduces the proportion of low-dielectricity air in the material, which increases the volumetric proportions bitumen and rock and thus results in higher asphalt dielectricity values.

The pavement layer dielectric value can be calculated by measuring the amplitude of the waveform peaks corresponding to reflections from the asphalt surfacing. Measurements can be done by speed up to 50-70 km/h by radar and one measurement cover an area, which size is about 300 x 300 mm². In the laboratory tests the main equipment was dielectricity probe, Percometer. The principles of the probe technique is based on measuring capacitance changes in the material.

The measurements have been performed in laboratory and in field sites. The objective of laboratory tests was to form a function between dielectric value and voids content. This function has been used later in processing the results of field site tests. In the field site tests the aim was to solve out the workability of the technique in the normal circumstances.

In the laboratory tests regression between dielectric value and voids content was good. The result of the laboratory tests also showed that the normal changes in bitumen content did not affect to the dielectric value.

In the field site tests correlation between radar prediction and voids content measured by core samples was good. Standard error was 0,9 percents in voids content measuring. Also the correlation between thicknesses measured by radar and ground truth data from core samples was good, standard error was 4,0 mm. The results clearly showed that ground penetrating radar technique with 1GHz horn antenna is suitable for pavements quality control.

ALKUSANAT

Tässä raportissa esitellään vuosina 1996-1997 tehtyjä päällystetutkatutkimuksia, joissa pyrittiin selvittämään päällystetutkan käyttömahdollisuuksia päällysteiden laadunvalvonnassa. Kehitystyöhön on kuulunut lukuisa määrä sekä laboratorio- että kenttätutkimuksia. Tutkimuksen aloite tuli Lapin tiepiiristä, jossa oli tarvittava mittauskalusto valmiina. Mukana projektissa ovat olleet Keskushallinnon Tie- ja liikennetekniikka -yksikkö, Uudenmaan- ja Lapin tiepiirit, Oulun yliopisto ja Neste Oy.

Julkaisun on valmistanut työryhmä, johon ovat kuuluneet ins. *Kalevi Toikkanen* Tie- ja liikennetekniikka -yksiköstä, rkm *Mikko Eerola* ja rkm *Ilkka Rantala* Uudenmaan tiepiiristä. Lapin tiepiiristä mukana olivat geol. *Timo Saarenketo*, ins. *Kalevi Luiro*, ins. *Jari Marjeta*, rkm *Reijo Jääskö*, rkm *Eero Salmijärvi* sekä raportin kirjoittajana DI *Petri Roimela*. Oulun yliopistosta mukana työryhmässä oli lab.ins. *Rauno Turunen* sekä Neste Oy:stä DI *Kari Hurtig*.

Rovaniemellä 7. tammikuuta 1998.

Tielaitos

Konsultointi, Rovaniemen alueyksikkö

Sisältö

1 JOHDANTO	9
2 LAITTEISTOJEN JA MENETELMIEN TEORIAA	10
2.1 Yleistä	10
2.2 Käytetyt laitteistot ja niiden toimintaperiaatteet	10
2.2.1 Dielektrisyyssondi	10
2.2.2 Päällystetutkalaitteisto	11
2.3 Tyhjätila- ja paksuusmääritysten lähtökohdat	14
2.3.1 Tyhjätilamääritykset	14
2.3.2 Paksuusmääritykset	15
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	16
3.1 Dielektrisyysmittaukset	16
3.1.1 Koekappalemittaukset	16
3.1.2 Koelaattamittaukset	16
3.1.3 Kenttämittaukset	16
3.2 Tutkimuksessa käytetyt vertailumenetelmät	17
3.2.1 Yleistä	17
3.2.2 Tyhjätilamääritykset	17
3.2.3 Sideainepitoisuusmääritykset	18
3.2.4 Paksuusmääritykset	18
4 LABORATORIOTUTKIMUKSET	19
4.1 Vuoden -96 koekappalemittaukset	19
4.1.1 Yleistä	19
4.1.2 Dielektrisyyssondimittaukset	19
4.1.3 Vertailumittaukset	20
4.1.4 Tulokset ja niiden tarkastelu	21
4.2 Vuoden -97 koekappalemittaukset	23
4.2.1 Yleistä	23
4.2.2 Mittaukset	23
4.2.3 Tulokset ja niiden tarkastelu	24
4.3 Koelaattamittaukset	24
4.3.1 Yleistä	24
4.3.2 Mittaukset ja mittausjärjestelyt	25
4.3.3 Tulokset ja niiden tarkastelu	27
4.4 Laboratoriomittausten johtopäätökset	29

5 KENTTÄMITTAUKSET	30
5.1 Yleistä	30
5.2 Mittauskohteet	30
5.3 Mittausjärjestelyt	33
5.4 Tulokset	34
5.4.1 Dielektrisyysmittaukset	34
5.4.2 Poranäytteet	36
5.4.3 Seurantamittaukset	36
5.4.4 Stabilointikohteet	36
6 TULOSTEN ANALYSOINTI	38
6.1 Tyhjätilamittaukset	38
6.1.1 Yleistä	38
6.1.2 Tyhjätilojen laskennan periaatteet	38
6.1.3 Kenttämittaus- ja poranäytetulosten vertailu	40
6.1.4 Tutkamittaustulosten ja DOR-mittaustulosten vertailu	42
6.2 Paksuusmittaukset	43
6.2.1 Yleistä	43
6.2.2 Paksuusmittaustulosten vertailu	43
7 MUUT TUTKIMUKSET	47
7.1 Yleistä	47
7.2 Tehdyt mittaukset	47
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	49
9 YHTEENVETO	51
KIRJALLISUUSLUETTELO	53
LIITTEET	55

1 JOHDANTO

Uuden päällysteen korkea laatutaso ja tasalaatuisuus ovat tärkeitä kriteereitä tien tulevan toimivuuden ja kestoiän kannalta. Tähän asti laadunvalvonta on tehty poranäytteiden tai DOR -menetelmän avulla. Molemmissa menetelmissä on kuitenkin puutteensa eivätkä tulokset ole aina tyydyttäneet. On ollut tarvetta menetelmään, jossa mittauksen kattavuus on korkea ja mittaus on nopea tehdä.

Maatutkaa on käytetty viime vuosina yhä useammissa kohteissa. Pääasiallisia käyttökohteita ovat olleet erilaiset tierakenteiden vauriotutkimukset sekä päällysteen ja päällysrakennekerrosten paksuuksien selvittäminen. Lisäksi tavallisia käyttökohteita ovat olleet erilaiset maa-ainestutkimukset, kuten maa-ainesten etsinnät ja maaperäkartoitukset.

Tutkimusprojektin taustana on Timo Saarenkedon 1996 /12/ tekemä aloite, jossa esitettiin periaatteet päällystetutkan ja dielektrisyyssondin käytöstä päällysteen tyhjätilan ja/tai bitumipitoisuuden riippuvuudesta. Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin maatutkan käyttömahdollisuuksien selvittäminen uusien päällysteiden laadunvalvonnassa. Kehitystyön lähtökohtana oli edellä mainittu tarve nopeaan mittausmenetelmään, jonka tulokset kattavat koko työkohteen. Mittaukset päällystetutkalla perustuvat päällysteen dielektrisyysvaihteluihin. Materiaalin dielektrisillä ominaisuuksilla tarkoitetaan niitä varausten siirtymiä, jotka ovat ominaisia kokonaisuudessaan sähköisesti neutraalille kappaleelle. Päällystetutkalla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa maatutkalaitteistoa, johon kuuluu 1 GHz:n kartiotorviantenni ja keskusyksikkö. Mittaukset voidaan päällystetutkalla tehdä noin 50-70 km/h nopeudella.

Tutkimus jakaantuu laboratorio- ja kenttätutkimuksiin. Laboratoriotutkimuksissa keskitytään dielektrisyys- ja tyhjätilan riippuvuuden selvittämiseen. Lisäksi selvitetään sideainepitoisuuden vaihteluiden vaikutukset dielektrisyysarvoon. Laboratoriotutkimusten koekappalemittaukset tehdään dielektrisyyssondilla, jolla mittaus perustuu kapasitanssin muutoksiin. Koekappaleen pinta-ala on liian pieni päällystetutkamittauksiin. Koelaatta ja kenttämittauksissa käytetään sekä päällystetutkaa että dielektrisyyssondia. Kenttämittauksissa pääpaino on selvittää päällystetutkan toimivuus tyhjätilamäärityksissä. Lisäksi kenttämittauksissa keskitytään päällysteen paksuuden määrittämiseen päällystetutkalla menetelmän toimivuuden varmistamiseksi. Tarvitavat tiedot sekä tyhjätilamäärityksiä että paksuusmäärityksiä varten saadaan samalla mittauksella. Kenttämittauksissa tutkimittauksen tuloksia vertaillaan pääasiassa poranäytteiden tuloksiin.

2 LAITTEISTOJEN JA MENETELMIEN TEORIAA

2.1 Yleistä

Tutkimuksessa käytetyillä dielektrisyyssondilla ja päällystetutkalla voidaan määrittää materiaalin suhteellinen dielektrisyysarvo. Materiaalin dielektrisillä ominaisuuksilla tarkoitetaan niitä varauksen siirtymiä, jotka ovat ominaisia kokonaisuudessaan sähköisesti neutraalille kappaleelle. Suhteellinen dielektrisyysvakio on siis väliaineelle ominainen arvo ja se on dimensioton suure.

Tiemateriaalien sähköisiä ominaisuuksia voidaan kuvata dielektrisyiden ja sähkönjohtokyvyn avulla. Lisäksi bitumia ja kuivaa kiviainesta voidaan pitää eristeinä, joten päällysteen sähköisiä ominaisuuksia voidaan kuvata pelkästään dielektrisyiden avulla. Kaikilla materiaaleilla on oma dielektrisyysarvonsa. Luonnossa dielektrisyysarvo voi vaihdella ilman arvosta yksi veden arvoon 81. Maaperässä veden dielektrisyysarvo riippuu veden sitoutumisasteesta siten, että tiukimmin sitoutuneen veden arvo lähentelee jään dielektrisyysarvoa 3,5-3,8. Kuivan murskeen dielektrisyysarvot vaihtelevat Suomessa yleensä 4,5-6,5 yksikön välillä. Bitumin dielektrisyysarvo ei suuresti vaihtele, vaan arvot ovat 2,6-2,8 yksikön välillä /14/.

Materiaalin dielektrisiä ominaisuuksia voidaan mitata usealla eri menetelmällä. Laboratoriossa käytettyjä menetelmiä dielektrisyyssondin lisäksi ovat mm. TDR- tekniikka ja Surface Network Analyser -tekniikka. Kenttämittauksia on tehty lähinnä maatutkan avulla, mutta myös TDR-tekniikkaa on käytetty jonkin verran. Eri menetelmien teoriaa ja toimintaperiaatteita on esitetty useissa julkaisuissa, esimerkiksi Campbell /4/, Fellner-Feldegg /6/ ja Kujala /7/.

2.2 Käytetyt laitteistot ja niiden toimintaperiaatteet

2.2.1 Dielektrisyyssondi

Dielektrisyyssondina mittauksissa käytettiin Lapin tiepiirissä jo useamman vuoden käytössä ollutta virolaisen Adek Ltd:n kehittämää dielektrisyys- ja sähkönjohtokykysondia. Kuvassa 1 on esitetty sondimittauksissa käytetyt laitteistot. Sondin keskitaajuus on 50 MHz. Laitteistolla dielektrisyiden määrittäminen perustuu kapasitanssin muutosten mittauksiin tutkittavassa materiaalissa. Kapasitanssin muutos voidaan määrittää kaavasta 1 /10/:

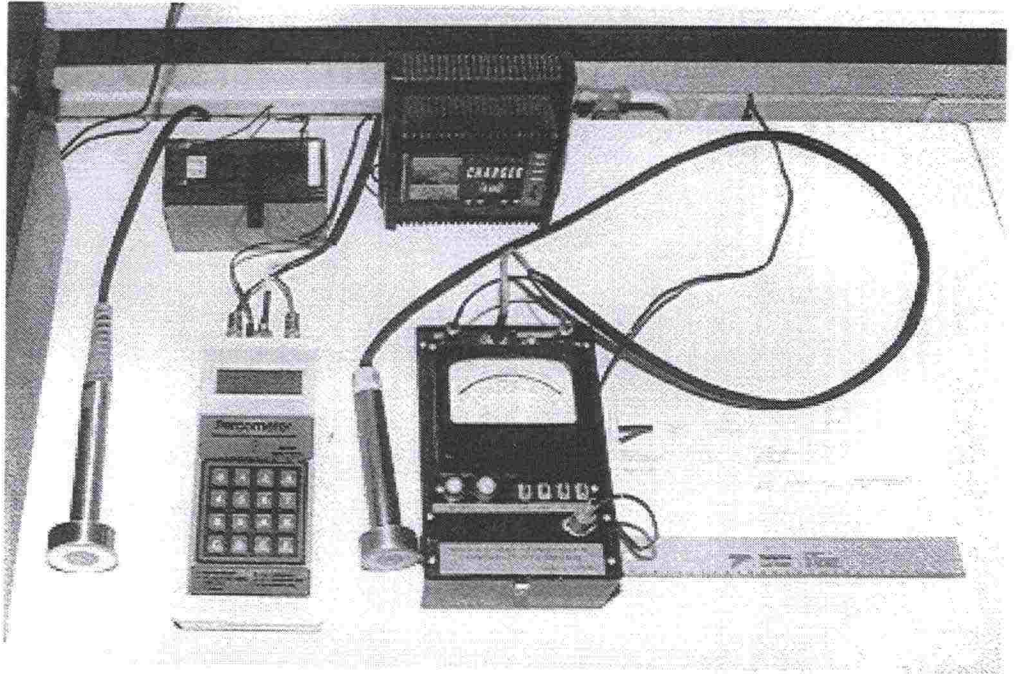
$$\Delta C = C_a (\varepsilon_r - 1) \quad (1)$$

missä: ΔC on kapasitanssin muutos

C_a on sondin aktiivinen kapasitanssi

ε_r on mitattavan materiaalin suhteellinen dielektrisyysarvo

Vuonna -96 käytettiin vanhempaa laitteistoa (kts. kuva 1, oikean puoleinen laitteisto), kun taas kesän 1997 mittauksissa käytettiin uudempaa versiota dielektrisyyssondista. Siinä keskusyksikkö on uusittu kokonaan ja mitta-anturin kokoa on suurennettu vanhaan verrattuna. Uusi laitteisto on selvästi nykyaikaisempi ja suuremman sondin myötä mittaustarkkuus on parantunut.



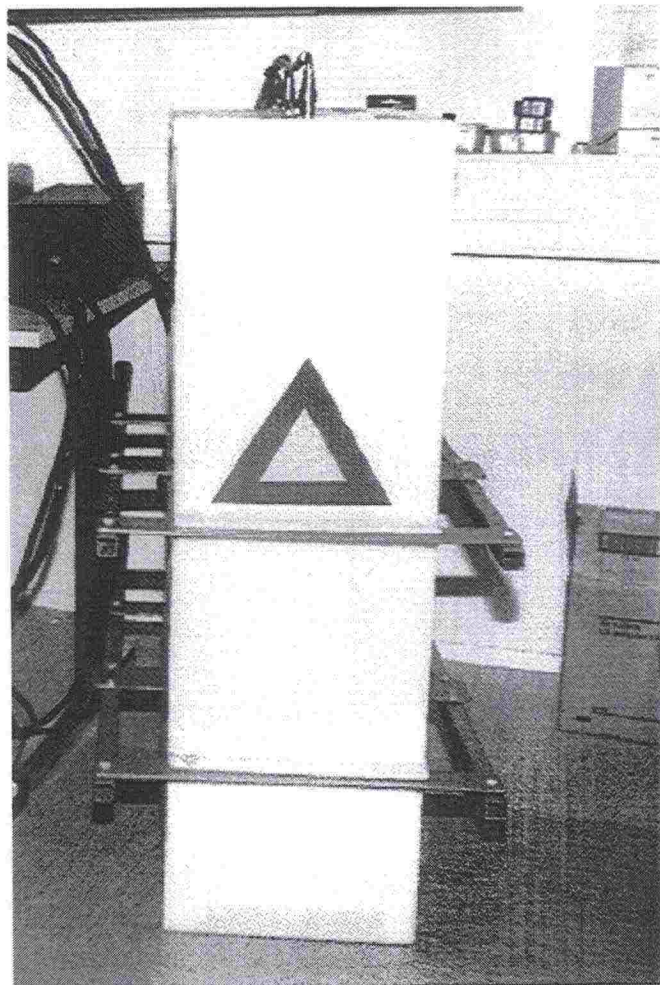
Kuva 1. Tutkimuksessa käytetyt dielektrisyyssondit ja mittauslaitteistot.

1.1.1 Päällystetutkalaitteisto

Päällystetutkamittauksissa käytettiin GSSI:n valmistamaa SIR 10H-laitteistoa. Antennina käytettiin 1000 MHz:n kartiotorviantennia. Dielektrisyysien määrittämisessä on käytetty kartiotorviantennille hyvin soveltuvaa heijastustekniikkaa. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty käytetty laitteisto sekä kartiotorvi-antenni.



Kuva 2. Päällystetutkamittauksissa käytetty SIR 10H -laitteisto.

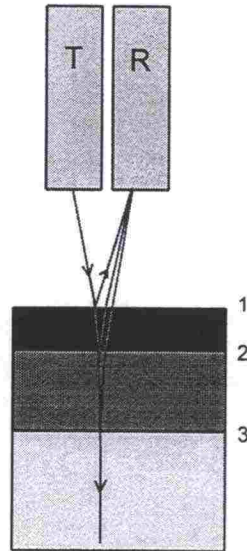


Kuva 3. Tutkimuksessa käytetty kartiotorviantenni.

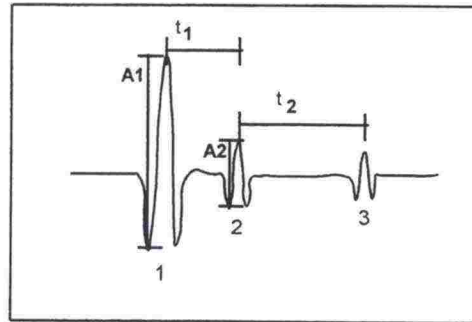
Kuvassa 4 on esitetty kartiotorviantennin toimintaperiaate. Kartiotorviantenni on ns. ilmastantenni, jolloin se mitauksissa on noin 0,5 metriä mitattavan kohteen yläpuolella. Mittauksissa tallennetaan kaksi mittaustulosta metriä kohden. Yksi mittaus kattaa noin $300 \times 300 \text{ mm}^2$ kokoisen alueen. Mittausnopeus on normaalisti 50 -70 km/h. Kuvassa 4 näkyvät lähettävä antenni (T) ja vastaanottava antenni (R). Numeroilla 1, 2 ja 3 on kuvattu tierakenteen eri kerroksia. Esimerkiksi yksinkertaisessa tapauksessa 1 on päällysteen pinta, 2 on kantavan kerroksen pinta ja 3 on jakavan kerroksen pinta /12, 13/.

Maatutka toimii periaatteessa kuten kaikuluotain, mutta maatutkalla luodattaessa maahan, tiehen tai veteen lähetetään UHF-VHF -taajuisia sähkömagneettisia pulsseja, jotka etenevät väliaineessa. Kun antennin lähettämät sähkömagneettiset pulssit kohtaavat sähköisen rajapinnan, esimerkiksi päällysteen pinnan, niin tapahtuu heijastus, jonka vastaanottava antenni rekisteröi. Laitteisto mittaa tätä heijastusta vastaavan amplitudin A1 eli päällysteen pinnan heijastusamplitudin. Samoin laitteisto rekisteröi muista rajapinnoista tapahtuvat heijastukset. Esimerkiksi kantavan kerroksen yläpinnan heijastusamplitudia vastaa kuvassa amplitudi A2. Lisäksi laitteisto mittaa amplitudien huippujen perusteella kahden rajapinnan välisen matkan kuluaikana /13/.

Antennipari



pyyhkäisy



t_1 = kulku aika päällysteessä

t_2 = kulku aika kantavassa kerroksessa

A_1 = päällysteen pinnan heijastusamplitudi
 A_2 = kantavan kerroksen yläpinnan heijastusamplitudi

Kuva 4. Kartiotorviantennin toimintaperiaate

Yleisesti voidaan heijastuskerroin määrittää kuvan 4 merkinnöin kaavalla 2 /3/:

$$R_{1-2} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2})}{(\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2})} \quad (2)$$

missä: R_{1-2} on heijastuskerroin kerrosten yksi ja kaksi rajapinnasta
 ε_1 on kerroksen yksi dielektrisyys
 ε_2 on kerroksen kaksi dielektrisyys

Heijastuskertoimet lasketaan rajapintojen heijastusamplitudeista. Asfaltin pinnasta heijastunut amplitudi voidaan laskea, kun tiedetään, että täysheijastus saadaan aikaiseksi metallilevyllä ja lisäksi huomioidaan, että ilman dielektrisyysarvo on yksi. Nyt voidaan laskea asfaltin pinnan heijastuksen amplitudin ja metallilevyn heijastuksen amplitudin suhde kaavalla 3 /3/:

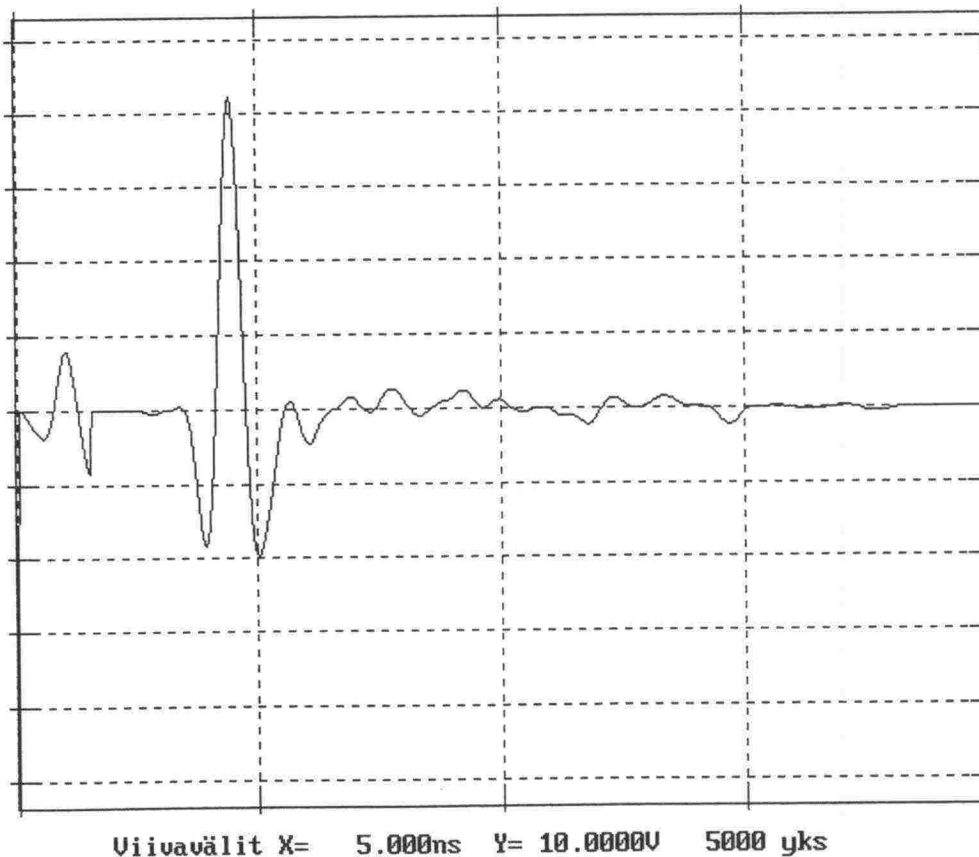
$$\frac{A_a}{A_m} = \frac{(1 - \sqrt{\varepsilon_a})}{(1 + \sqrt{\varepsilon_a})} \quad (3)$$

missä: A_a on asfaltin pinnan heijastusamplitudi
 A_m on metallilevyn heijastusamplitudi
 ε_a on asfaltin dielektrisyys

Kaavasta 3 voidaan ratkaista asfaltin pinnan suhteellinen dielektrisyysarvo $\epsilon_a / 3$:

$$\epsilon_a = \left(\frac{1 - A_a / A_m}{1 + A_a / A_m} \right)^2 \quad (4)$$

Metalliilevystä mitattu amplitudi vastaa täyden heijastuksen amplitudia. Kuvassa 5 on tyypillinen metallihevyn heijastuksen amplitudi.

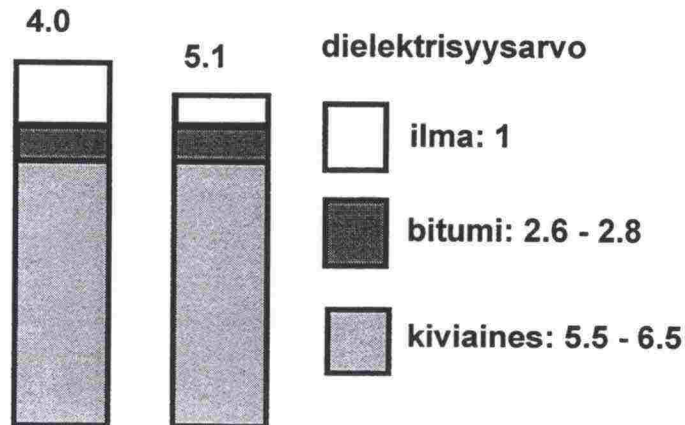


Kuva 5. Tyypillinen metallihevyn heijastuksen amplitudi.

2.3 Tyhjätila- ja paksuusmääritysten lähtökohdat

2.3.1 Tyhjätilamääritykset

Koska päällysteen dielektrisyysarvo on päällysteen komponenttien funktio, niin päällysteelle ei voida määrittää yhtä dielektrisyysarvoa. Päällysteen dielektrisyysarvo kasvaa tiivistyksen seurauksena, koska päällysteen tyhjätila pienenee eli suhteellinen ilmanosuus päällysteen tilavuudesta laskee. Tämä on ollut lähtökohtana tutkimuksen tyhjätilamäärityksille. Kuvassa 6 on esitetty periaate tiivistyksen vaikutuksesta päällysteen dielektrisyyteen /12/.



Kuva 6. Tiivistyksen periaatteellinen vaikutus päällysteen dielektrisyteen.

2.3.2 Paksuusmääritykset

Päällysteen paksuuden mittaamista tutkalla on tutkittu mm. Yhdysvalloissa Teksasissa /8/. Näissä tutkimuksissa tarkkuudeksi saatiin ilman poranäytteitä ± 8 mm. Kun poranäytteitä käytettiin tulkinnessa apuna, oli tarkkuus ± 3 mm. Rutiinimittauksia on tehty jo monia vuosia ympäri maailmaa. Tämän vuoksi paksuusmittausten teoreettisen toimivuuden todistamista ei tässä tutkimuksessa tehty, vaan keskityttiin kenttämittauksissa pelkästään menetelmän toiminnan varmistamiseen ja tutkimustiedon keräämiseen. Päällysteen paksuus h voidaan dielektrisyden ja kulkuajan avulla ratkaista kaavasta 5 /5/:

$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{\sqrt{\epsilon_a}} \quad (5)$$

missä: c on valon nopeus tyhjiössä
 Δt on kulku aika päällysteen pinnasta päällysteen pohjaan
 ϵ_a on päällysteen dielektrisyys

Paksuuden avulla voidaan kääntäen laskea myös dielektrisyysarvo. Kun tunnetaan todellinen päällysteen paksuus ja kulku aika päällysteen pinnasta päällysteen pohjaan voidaan kaavaan sijoittamalla laskea päällysteen dielektrisyysarvo. Menetelmän tarkkuus ei kuitenkaan ole riittävä dielektrisyysarvon määrittämiseen kulkuajan määrittämisen epätarkkuuden takia /14/.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Dielektrisyysmittaukset

3.1.1 Koekappalemittaukset

Koekappalemittauksissa tutkittiin dielektrisyyden ja päällysteen eri komponenttien välisiä suhteita ja niiden vaikutuksia sekä luomaan malli dielektrisyyden ja tyhjätilan välille. Lisäksi selvitettiin bitumipitoisuuden vaikutus päällysteen dielektrisyyteen. Tavoitteena oli siis selvittää tyhjätilamittauksen peruslähtökohdan teoreettinen toimivuus. Koekappalemittauksissa mitattiin kappaleiden dielektrisyysarvot dielektrisyyssondilla. Vertailukohdaksi jokaiselle koekappaleelle määritettiin tyhjätila sekä sideainepitoisuus normaaleilla laboratoriomenetelmillä. Vuoden -96 koekappalemittauksia verten näytteet valmistettiin Neste Oy:n toimesta Porvoossa. Tutkimukset tehtiin Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Vuoden -97 koekappaleet valmistettiin ja tutkittiin puolestaan Lapin tiepiirin laboratoriossa Rovaniemellä.

3.1.2 Koelaattamittaukset

Koelaattamittauksia tehtiin sekä sondilla että päällystetutkalla. Niissä tutkittiin kuten koekappalemittauksissa dielektrisyyden ja tyhjätilan välistä suhdetta laboratorio-olosuhteissa. Mittausten tavoitteena oli täydentää koekappalemittausten tuloksia sekä tutkia tyhjätilamittausten teorian toimivuutta myös päällystetutkalla mitattaessa. Lisäksi selvitettiin tutkimittausten mittauskorkeuden vaikutusta mittaustuloksiin. Tätä tutkittiin mittaamalla dielektrisyyksiä eri korkeuksista ja käyttämällä metallilevyä laatan alla. Dielektrisyyksille vertailukohdaksi koelaatoista porattiin näytteitä laattojen tiiviysien määrittämiseksi. Porapaloista määritettiin tyhjätilat normaaleilla laboratoriomenetelmillä. Koelaatat valmistettiin ja tutkittiin Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa.

3.1.3 Kenttämittaukset

Kenttämittausten tavoitteena on selvittää tutkalla mitattujen tyhjätilojen ja poranäytteistä määritettyjen tyhjätilojen ja toisaalta DOR-menetelmällä mitattujen tyhjätilojen välistä suhdetta vasta päällystetyillä työmaakohteilla. Dielektrisyys mitattiin myös dielektrisyyssondilla. Päällystetutkalla mitatut dielektrisyysarvot muutettiin laboratoriomittausten tulosten avulla tyhjätila-arvoiksi ja näitä arvoja verrattiin poranäyte- sekä DOR-tuloksiin. Toisena tavoitteena oli selvittää päällystetutkalla mitattujen ja poranäytteistä mitattujen päällysteen paksuuksien suhdetta. Kenttämittauksia tehtiin myös ns. Static Shot -mittauksia, jotta voitaisiin kohdentaa mittaus tarkasti tiettyyn pisteeseen. Static Shot -mittauksella tarkoitetaan mittausa, kun auto pysäytetään paikalleen ja mitataan tarkasti tietyistä pisteistä. Lisäksi pyrittiin selvittämään mittauksissa esiintyviä ongelmia ja mahdollisia lisätutkimustarpeita. Kenttämittauksia tehtiin Uudenmaan, Lapin ja Oulun tiepiirien alueilla.

Kenttämittauksissa mitattiin päällystetutkalla tiekohde läpi siten, että mittaus-tulos saadaan puolen metrin välein. Mittaukset tehtiin noin 50 km/h nopeu-

della antennin ollessa auton edessä. Näin saatiin dielektrisyyksistä jatkuva profiili. Profiiliin avulla valittiin joka kohteesta pistemittauspaikat, joista mitattiin dielektrisyydet sekä sondilla että tutkalla Static Shot-mittauksena. Samasta pisteestä porattiin näytteet ja näille rinnakkaisnäytteet noin 0,3 metrin etäisyydeltä. Poranäytteistä selvitettiin tyhjätilat normaalein laboratoriomenetelmin.

3.2 TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT VERTAILUMENETELMÄT

3.2.1 Yleistä

Tutkimusmenetelmille on myös asetettu omat laatuvaatimukset. Tässä tutkimuksessa käytetyt vertailumenetelmät ovat hyväksytyjä PANK:in menetelmiä. Menetelmien tarkat kuvaukset on esitetty PANK:in ohjeissa /9/.

3.2.2 Tyhjätilamääritykset

Laboratoriotutkimukset:

Tyhjätilamääritykset tehtiin kaikille koekappaleille ja poranäytteille. Poranäytteistä määritettiin kaikista erikseen päällysteen tiheys, mutta massan tiheyttä varten rinnakkaisnäytteet yhdistettiin riittävän massamäärän saavuttamiseksi. Tyhjätilamääritykset tehtiin tutkimuksessa AB-päällysteille ilma-vesipunnitusmenetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4110 mukaisesti /9/ ja SMA-päällysteille imeytys-pintakuivausmenetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4112 mukaisesti /9/. Tyhjätilan määrittämistä varten tarvitaan lisäksi massan tiheys, joka määritettiin Risen -menetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4109 mukaisesti /9/.

DOR-mittaukset:

DOR-mittaukset ovat lisääntyneet tyhjätilan määrityksissä viime vuosina. Tämän vuoksi haluttiin vertailla kenttämittauksissa dielektrisyyksien perusteella määritettyjen tyhjätilojen ja DOR-menetelmän mukaisten tyhjätilojen suhdetta. DOR-tuloksia ei mitata yleensä koko kohteesta, joten vertailemaan pystyttiin vain niiltä osin kuin DOR-mittaukset oli tehty.

DOR-menetelmän perusidea on sama kuin päällystetutkassa, mutta säteily on eri tyypistä. Mittaus perustuu radioaktiivisen Cesium Cs-137 säteilyn takaisinsirontaperiaatteeseen. Säteily heijastuu takaisin päällystekerroksen alapinnasta. Laite mittaa päällysteen tiheyttä, jolloin tyhjätilaa määritettäessä massan tiheys oletetaan vakioksi. Massan tiheytenä käytetään joko teoreettista tiheyttä tai massanäytteestä määritettyä tiheyttä /1/.

Mittauksia tehtiin sekä Uudenmaan että Lapin tiepiirien alueilla. Mittaukset tehtiin PANK:n ohjeen n:o 4113 mukaisesti /9/. DOR-tuloksille on tyypillistä suuri hajonta, selvästi suurempi kuin esimerkiksi poranäytteistä määritettyjen tulosten keskihajonta. DOR-mittausten yhtenä laadunvalvontakriteerinä käytetäänkin keskihajontaa /1/.

3.2.3 Sideainepitoisuusmääritykset

Sideainepitoisuus määritettiin vuoden -96 tutkimuksessa kaikille koekappaleille. Koekappalemittausten tulosten perusteella päätettiin, että tarvitaanko kenttämittausten poranäytteistä määrittää sideainepitoisuutta. Jatkotutkimuksessa sideainepitoisuuden määrittäminen ei koekappaleista tehty. Sideainepitoisuus määritettiin vuoden -96 tutkimuksessa päällysteen koekappaleista uutto-haihdutusmenetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4109 mukaisesti /9/.

3.2.4 Paksuusmääritykset

Päällystetutkalla mitatuille paksuuksille vertailuksi mitattiin paksuudet käyttämällä mittanauhaa. Mittaukset tehtiin poranäytteistä neljästä eri kohtaa. Neljän mittauksen tulosten keskiarvo laskettiin ja saatua tulosta käytettiin poranäytteen paksuuden arvona. Jos poranäytteessä oli useampia kerroksia, mitattiin vain uuden päällysteen paksuus.

4 LABORATORIOTUTKIMUKSET

4.1 Vuoden -96 koekappalemittaukset

4.1.1 Yleistä

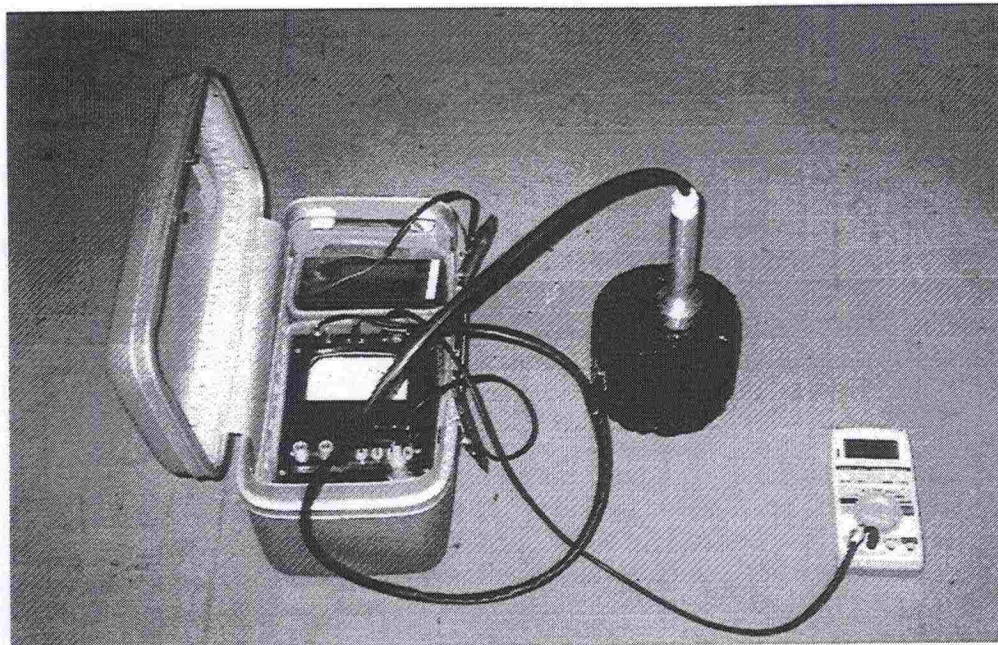
Vuoden -96 tutkimuksen koekappalemittausten tavoitteena oli selvittää dielektrisyyden ja päällysteen eri komponenttien välisiä riippuvuuksia. Tavoitteena oli myös mallintaa dielektrisyyden ja tyhjätilan välistä yhteyttä. Mallin avulla voidaan muuttaa dielektrisyysien arvot tyhjätilan arvoiksi.

Koekappaleista mitattiin dielektrisyysarvot dielektrisyyssondilla. Koekappaleen pinta-ala on liian pieni tutkimittauksiin, joten tutkimittauksia ei voitu tehdä. Vertailukohdaksi dielektrisyydelle mitattiin kaikkien kappaleiden tyhjätilat ja sideainepitoisuudet.

Koekappaleita valmistettiin neljästä eri kiviaineksesta, joiden dielektrisyysarvot olivat lähellä toisiaan. Kaksi murskeista oli Uudenmaan tiepiiristä ja kaksi Lapin tiepiiristä. Uudenmaan murskeista valmistetut koekappaleet olivat massoiltaan AB 16 Latostenmaan soramurskeesta ja SMA 18 Koskenkylän vulkaniitista. Lapin kiviaineksista valmistetut koekappaleet olivat AB 16 Vaiskokurun happamasta vulkaniitista ja AB 25 Kuusajärven granodioriitista. Koekappaleita oli yhteensä 108 kappaletta. Määrä koostui neljästä eri kiviaineksesta, kolmesta eri teoreettisesta bitumipitoisuudesta, kolmesta eri tiiviysasteesta ja kolmesta eri rinnakkaisnäytteestä. Tavoitteena oli, että bitumipitoisuus vaihtelisi 0,3-0,4 prosenttia eri asfalttityypeille suhteutuksessa saadun optimisideainepitoisuuden molemmin puolin.

4.1.2 Dielektrisyyssondimittaukset

Koekappaleiden dielektrisyysmittaukset tehtiin virolaisen Adek Ltd:n kehittämällä dielektrisyys- ja sähkönjohtokykysondilla. Tutkimuksen aikana valmistajalta tuli uusi, nykyaikaisempi laitteisto. Lisäksi sondin anturin kokoa oli suurennettu paremman mittaustarkkuuden saavuttamiseksi. Kuvassa 7 on esitetty vanhempi dielektrisyyssondi ja mittaustarvikkeisto. Kuvasta näkyvät myös koekappalemittausten mittausjärjestelyt. Koekappaleista mitattiin dielektrisyysarvot sekä pinnasta että pohjasta. Mittaustuloksista laskettiin pinnan ja pohjan dielektrisyysien keskiarvo, joka valittiin vastaamaan koekappaleen dielektrisyttä.



Kuva 7. Tutkimuksissa käytetyt dielektrisyyssondi ja mittauslaitteisto sekä mittausjärjestelyt.

Koekappaleiden vuoden -96 dielektrisyysmittausten tulokset ovat *liitteellä 1*. Taulukkoon 1 on koottu jokaisen koekappaleryhmän dielektrisyysien keskiarvo sekä pienin ja suurin arvo.

Taulukko 1. Tiivistelmä vuoden -96 koekappalemittausten dielektrisyysarvoista.

kiviaines	dielektrisyys		
	minimiarvo	keskiarvo	maksimiarvo
Latostenmaa	3,7	4,5	5,1
Koskenkylä	2,5	3,4	4,2
Vaiskokuru	3,2	3,8	4,5
Kuusajärvi	3,0	3,7	4,4

Sondimittausten tulosten tarkkuuteen vaikuttaa huolellisuus mitattaessa merkittävästi. Selvästi eri voimalla koekappaleen pintaan painettaessa saadaan sondilla hieman toisistaan poikkeavia tuloksia. Samoin mittauspisteen valinta koekappaleen pinnalta tulee tehdä harkiten, sillä esimerkiksi kolon kohdalta mitattaessa saadaan pienempiä arvoja kuin tasaiselta pinnalta. Pinnan karkeuden vaikutus tuloksiin on selvä, se havaittiin erityisesti karkeapintaisista SMA-näytteistä.

1.1.1 Vertailumittaukset

Kaikista koekappaleista määritettiin tyhjätilat ja sideainepitoisuudet. Menetelminä käytettiin hyväksytyjä PANK:n menetelmiä /9/. Koekappaleiden mittaustulokset on esitetty *liitteellä 1*, jolla on myös dielektrisyysmittausten tulokset.

Tyhjättila:

Tavoitteena koekappaleiden valmistusvaiheessa oli saada näytteiden tyhjätiloille riittävän suuri vaihteluväli, jotta analysointia varten saadaan tuloksiin kattavuutta. Tähän pyrittiin muuntelemalla tiivistyskierrosten määriä tiivistettäessä. Yleisesti ottaen olisi pienin tiivistysmäärä tullut olla vieläkin pienempi, jolloin olisi saatu vielä suurempia tyhjätila-arvoja mukaan tarkasteluun. Menetelminä käytettiin AB-koekappaleille ilma-vesipunnitusmenetelmää eli IV-menetelmää ja SMA-koekappaleille imeytys-pintakuivausmenetelmää eli IPK-menetelmää PANK:n ohjeiden mukaisesti /9/. Taulukossa 2 on esitetty tiivistelmä tyhjätilamittausten tuloksista.

Taulukko 2. Tiivistelmä vuoden -96 koekappalemittausten tyhjätila määrityksistä.

kiviaines	tyhjätila (%)		
	minimiarvo	keskiarvo	maksimiarvo
Latostenmaa, AB 16	0,3	0,9	2,1
Koskenkylä, SMA 18	1,3	3,6	6,4
Vaiskokuru, AB 16	0,4	2,5	4,9
Kuusajärvi, AB 25	0,9	2,4	5,1

Sideainepitoisuus:

Bitumipitoisuudet määritettiin jokaisesta koekappaleesta erikseen uutto-haihdutusmenetelmällä PANK:n ohjeiden mukaisesti /9/. Jokaisesta koekappaleesta erikseen muodostetusta massasta liuotettiin haihdutettavaksi kaksi rinnakkaisnäytettä, joiden keskiarvosta saatiin koekappaleen bitumipitoisuus.

Taulukossa 3 on esitetty tiivistelmä bitumipitoisuusmittauksien tuloksista. Tuloksista havaitaan, että hajonta on selvästi suurempi kuin oli tavoitteena. Tällä ei ole kuitenkaan tutkimuksen kannalta merkitystä, koska jokaisen kappaleen bitumipitoisuus on määritetty erikseen. Liitteellä 1 olevista tuloksista havaitaan myös, että rinnakkaisnäytteidenkin välillä on selviä eroja pitoisuuksissa. Tämä johtunee koekappaleiden valmistuksen aikaisesta lajitumisesta, jolloin rakeisuus on jakautunut epätasaisesti rinnakkaisnäytteiden kesken. Epätasainen rakeisuuden jakautuminen heijastuu myös bitumipitoisuuksiin.

Taulukko 3. Tiivistelmä vuoden -96 koekappalemittausten sideainepitoisuusmäärityksistä.

kiviaines	sideainepitoisuus (%)		
	minimiarvo	keskiarvo	maksimiarvo
Latostenmaa	4,9	5,4	5,7
Koskenkylä	5,2	6,4	7,2
Vaiskokuru	5,0	5,5	6,3
Kuusajärvi	4,5	5,1	5,8

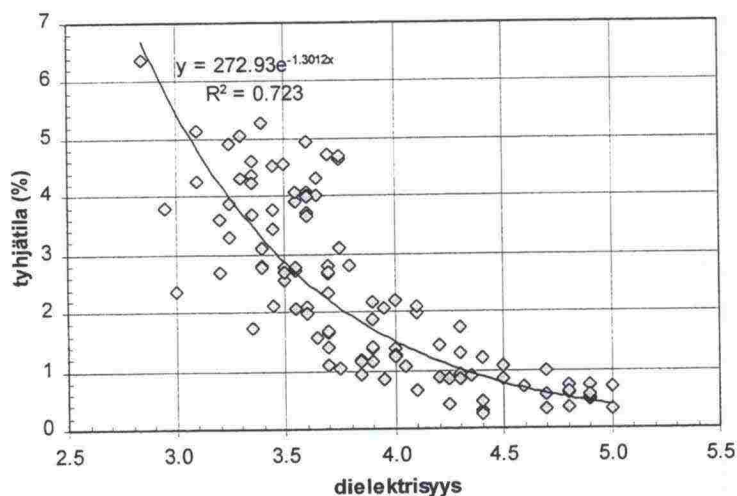
4.1.4 Tulokset ja niiden tarkastelu

Koekappalemittausten perusteella oli tarkoitus selvittää mahdollisesti olemassa olevat riippuvuudet dielektrisyyden ja muiden mitattujen ominaisuuksien välillä. Lisäksi tavoitteena oli pyrkiä mallintamaan dielektrisyyden ja eri tekijöiden välisiä yhteyksiä. XY-koordinaatistoon sijoitetuille arvopisteille

laskettiin pienimmän neliösumman menetelmällä parhaiten sopiva regressioyhtälö. Sovituksen tuloksena saadaan myös selitysaste R^2 , joka kuvaa yhtälön sopivuutta aineistoon.

Dielektrisyys ja tyhjätila:

Koekappalemittausten perusteella voidaan todeta, että teoria dielektrisyiden ja tyhjätilan välillä on toimiva. Kuvan 8 perusteella voidaan todeta, että dielektrisyiden ja tyhjätilan välillä on selvä riippuvuus. Selitysaste $R^2 = 0,723$ on vahva. Parhaiten riippuvuuden muotoa kuvaa eksponentiaalinen yhtälö.



Kuva 8. Dielektrisyiden ja tyhjätilan välinen suhde laboratoriotutkimuksissa.

Tulee kuitenkin huomata, että varsinkin karkeapintaisilla SMA-koekappaleilla pinnan karkeuden vaikutus mittaustuloksiin oli selvästi havaittavissa. Tämä oli kuitenkin odotettavissa, koska sondi mittaa päällysteen pinnasta noin 20 mm:n syvyyteen.

Dielektrisyys ja sideainepitoisuus:

Dielektrisyiden ja sideainepitoisuuden välinen selitysaste jäi erittäin heikoksi. Tulosten perusteella dielektrisyiden ja sideainepitoisuuden välillä ei ole riippuvuutta. Näin dielektrisyiden perusteella ei voida selittää bitumipitoisuuden vaihteluita päällysteessä. Voidaan siis todeta, etteivät normaalit bitumipitoisuuden ($\pm 0,4-0,5$ %) vaihtelut vaikuta merkittävästi päällysteen dielektrisyysarvoon.

Lisäksi regressioanalyysin avulla selvitettiin bitumipitoisuuden ja tyhjätilan vaikutusta päällysteen dielektrisyteen. Selitettäväksi tekijäksi valittiin dielektrisyys ja selittäviksi tyhjätila ja bitumipitoisuus. Tuloksia voitiin vertailla selityksasteen ja selittämättä jääneiden poikkeamien neliösumman avulla. Mallin selitysaste kasvaa aina, kun siihen lisätään selittäviä tekijöitä, mutta keski-
virhe saattaa kasvaa merkittävästi. Toisaalta yksittäisten kertoimien P-arvon avulla voidaan päätellä kertoimen käytön riskejä. Tarkastelun pohjalta voidaan ratkaista, tarvitaanko dielektrisyiden ja tyhjätilan välisessä mallissa mukana sideainepitoisuuden vaikutusta.

Regressioanalyysin perusteella voidaan todeta, että dielektrisyyden mallintaminen yhdessä tyhjätilan ja bitumipitoisuuden kanssa ei tuo merkittävää parannusta päällysteen dielektrisyyden ennustamiseen verrattuna pelkästään tyhjätilan avulla tapahtuvaan dielektrisyyden mallintamiseen. Bitumipitoisuus mallissa ei paranna merkittävästi selityksasteita, vaan ne säilyvät lähes samoina. Mallin avulla selittämättä jääneiden poikkeamien osuus ei myöskään vähene merkittävästi, vaikka bitumipitoisuus olisi mukana.

Nolla hypoteesin, eli sideainepitoisuuden kerroin on nolla, hylkäämisen riski oli pienimmilläänkin Latostenmaan koekappaleissa prosenttien luokkaa. Muilla koekappaleilla riski kasvaa yli 50 prosentin, joten bitumipitoisuuden käyttö ei ole perusteltua. Latostenmaankin kohdalla riski virheellisestä tulkinnasta on olemassa, joten myöskään sillä ei tulisi sideainepitoisuutta ottaa mukaan tulkintaan.

4.2 Vuoden -97 koekappalemittaukset

4.2.1 Yleistä

Jatkotutkimuksen koekappalemittausten tavoitteena oli selvittää dielektrisyysdeltään erilaisten kiviainesten sekä toisaalta erilaisten päällystetyyppien vaikutusta dielektrisyyteen sekä dielektrisyyden ja tyhjätilan väliseen yhteyteen. Lisäksi testattiin uutta, parannettua sondia, jonka pitäisi reagoida pinnan karkeuteen aikaisempaa vähemmän. Uusi sondi on esitetty kuvassa 1 sivulla 2. Siinä mitta-anturi on halkaisijaltaan isompi kuin aiemmassa mallissa. Isomman anturin avulla syvyysulottuvuus on myös suurempi.

Mittauksissa oli mukana kaksi vuoden -96 tutkimuksen kiviainesta, Koskenkylän ja Vaiskokurun murskeet, joista tehtiin vastaavia massoja kuin vuoden -96 tutkimuksessa. Lisäksi tehtiin AB 16 koekappaleita Lohisarrion sora-murskeesta ja AB 16 emulsiokoekappaleita Palovaaran sora-murskeesta. Jokaisesta murskeesta tehtiin 12 koekappaletta, joissa oli sama suhteutus ja sama bitumipitoisuus. Jokaisen sarjan koekappaleiden tiivistysmäärää vaihdeltiin eli hajontaa pyrittiin saamaan tyhjätiloihin.

4.2.2 Mittaukset

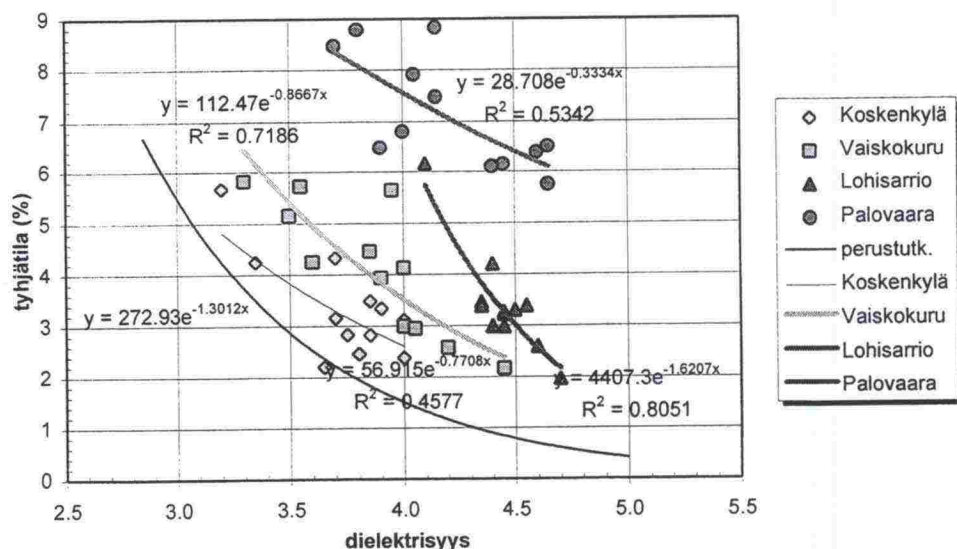
Koekappaleista mitattiin dielektrisyys vastavalla tavalla kuin vuoden -96 tutkimuksen mittauksissa. Vertailumittauksena määritettiin jokaisesta koekappaleesta tyhjätila PANK:n ohjeiden /9/ mukaisin menetelmin kuten vuoden -96 tutkimuksessa. Taulukossa 4 on esitetty vuoden -97 dielektrisyysien ja tyhjätilojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot. Liitteellä 2 on esitetty mittausten täydelliset tulokset.

Taulukko 4. Tiivistelmä vuoden -96 tutkimuksen koekappalemittausten tuloksista.

kiviaines	dielektrisyys			tyhjätila (%)		
	min	ka	maks	min	ka	maks
Koskenkylä, SMA 18	3,2	3,7	4,0	2,2	3,3	5,7
Lohisarrio, AB 16	4,1	4,4	4,7	2,0	3,4	6,2
Vaiskokuru, AB 16	3,3	3,9	4,5	2,2	4,1	5,8
Palovaara, emulsio	3,5	4,2	4,7	5,7	7,1	8,8

4.2.3 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tulokset on esitetty kuvassa 9. Kuvan perusteella voidaan todeta, että vaikka eri koekappalesarjojen dielektrisyys on lähellä toisiaan, niin tyhjätila-arvoissa on suuria eroja. Tämän selittää se, että päällysteen dielektrisyys tasoon vaikuttaa selvästi eniten kiviaineksen dielektrisyys. Regressiot eri sarjoissa ovat keskinkertaisia tai vahvoja. Huomattavaa on, että SMA-koekappaleiden kohdalla regressio on selvästi parempi kuin vuoden -96 tutkimuksen mittauksissa. Uusi sondi reagoi selvästi vähemmän pinnan karkeuteen kuin vanha malli. Uudella sondilla tulokset ovat myös selvästi nopeammin käytössä, koska laite laskee dielektrisyys automaattisesti. Vanhassa mallissa piti laskenta suorittaa mittausten jälkeen erillisellä tietokoneella. Lisäksi verrattaessa molemmissa koekappalemittauksissa olleiden murskeiden tuloksia, voidaan havaita, että uusi sondilla mitatut dielektrisyys ovat selvästi suurempia kuin vanhalla. Tämä johtuu siitä, että sondin syvyysulottuvuus on suurempi ja näin pinnan karkeuden vaikutus on pienempi. Näin vanhalla ja uudella sondilla mitatut tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia.



Kuva 9. Vuoden -97 tutkimuksen koekappalemittausten dielektrisyysien ja tyhjätilojen suhde.

Kuvaan 9 on asetettu myös vuoden -96 tutkimuksessa saatu kaikkien mittaustulosten eksponentiaalinen sovitus, jotta nähdään sen keskimääräinen sopiminen vuoden -97 tutkimuksen aineistoon. Kuvan perusteella nähdään, että korjauskerrointa käyttämällä tulokset saadaan hyvin sovitettua vuoden -96 tutkimuksen keskimääräiselle käyrälle. Näin keskimääräistä käyrää voidaan käyttää riittävällä tarkkuudella kenttämittausten tulosten tyhjätilojen laskentaan.

4.3 Koelaattamittaukset

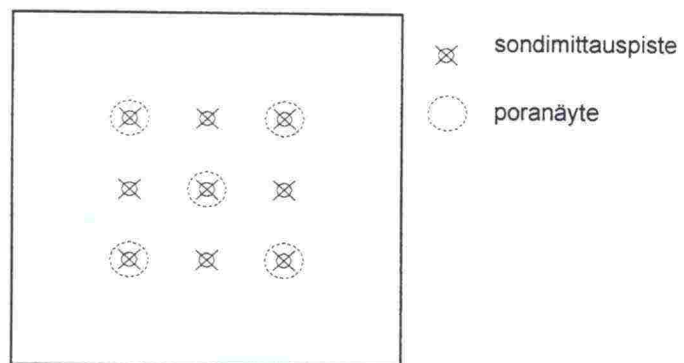
4.3.1 Yleistä

Koelaattamittausten tarkoituksena oli täydentää koekappalemittausten tuloksia. Dielektrisyysarvot voitiin määrittää laatoista dielektrisyyssondin lisäksi myös päällystetutkalla, sillä laattojen pinta-ala oli yksi neliömetri. Koska haluttiin selvittää myös mittauskorkeuden mahdollinen vaikutus tuloksiin, mitattiin tutkalla käyttäen kahta eri mittauskorkeutta sekä metallilevy laatan alla että ilman metallilevyä.

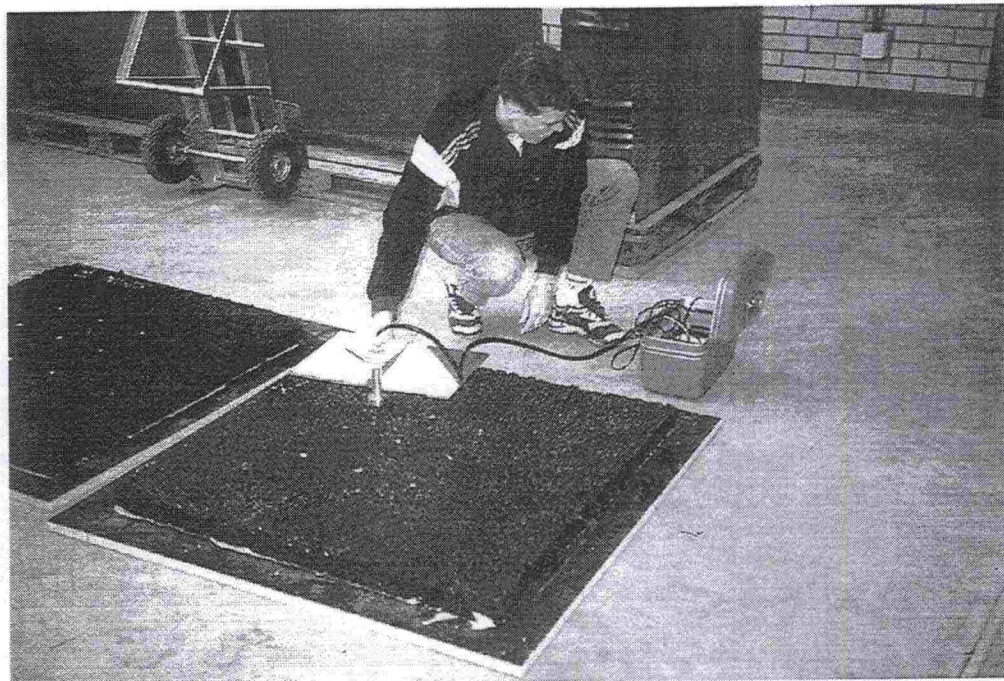
Laattoja valmistettiin kuusi kappaletta. Käytössä oli kahta eri kiviainesta: Koskenkylän ja Vaiskokurun kalliomurskeita. Koskenkylän murskeesta tehtiin SMA 18-laattoja ja Vaiskokurun murskeesta AB 16-laattoja. Kaikissa samasta kiviaineksesta valmistetuissa laatoissa oli sama sideainepitoisuus, jolla pyrittiin eliminoimaan sideaineen mahdollinen vaikutus mittauksituloksiin. Sen sijaan laatat tiivistettiin eri tiiviyksiin tyhjätilaerojen aikaansaamiseksi.

4.3.2 Mittaukset ja mittausjärjestelyt

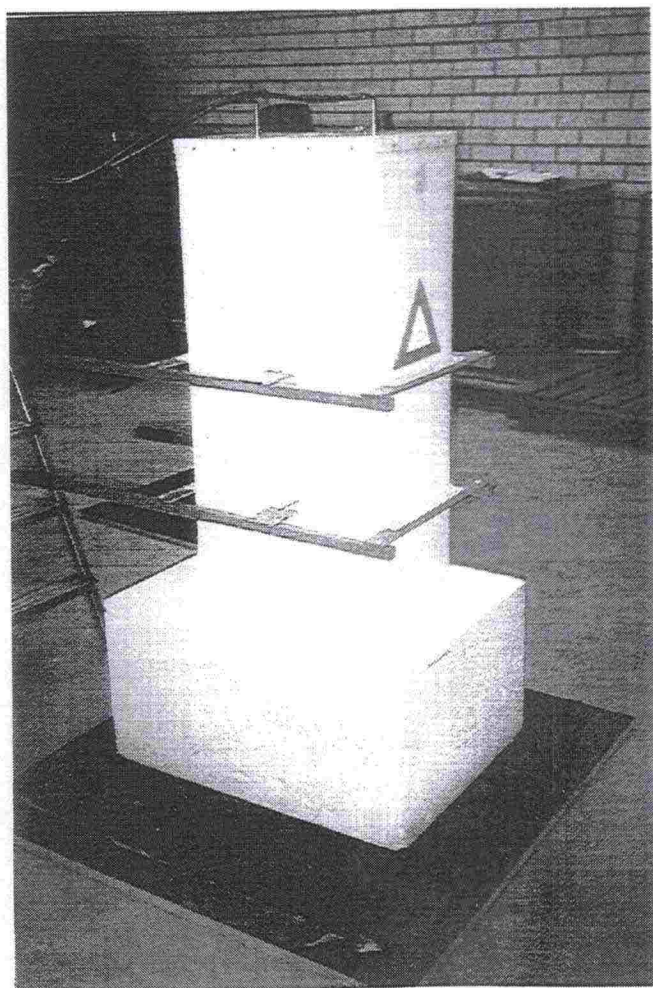
Kuvassa 10 on esitetty sondimittauspisteet. Jokaisesta pisteestä mitattiin sondilla dielektrisyysarvo. Tulokset käsiteltiin siten, että pienin ja suurin arvo poistettiin ja jäljelle jääneistä laskettiin keskiarvo. Tämä arvo edustaa koko laatan dielektrisyysarvoa sondilla mitattuna. Kuvassa 11 ovat koelaattojen sondimittaukset käynnissä.



Kuva 10. Laattojen sondimittauspisteet ja porauskaavio.



Kuva 11. Koelaattojen sondimittaukset käynnissä.



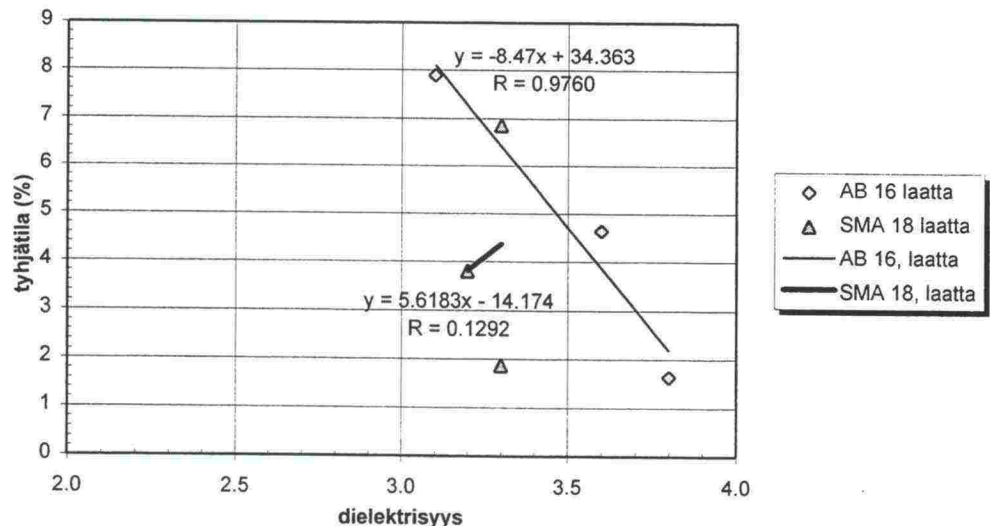
Kuva 12. 1 GHz:n kartiotorviantenni sekä koelaattojen mittausjärjestelyt.

Kuvassa 12 on esitetty päällystetutkamittausten mittausjärjestelyt ja mittaus-tapahtuma. Koelaattatutkimuksissa päällystetutkamittaukset suoritettiin styrox -kappaleen läpi, jolloin tutka saatiin asetettua tarkemmin laatan keskelle ja aina kohtisuoraan asfalttilaattaa vastaan. Mittauskorkeuksina käytettiin 300 mm ja 600 mm.

Lopuksi jokaisesta laatasta porattiin viisi näytettä tyhjätilan laboratoriomääri-tyksiä varten. Porauskaavio on esitetty kuvassa 10. Näytteistä mitattiin päällysteen tiheydet AB-laatoista poratuille näytteille PANK:n ohjeiden mukaisesti /9/. Kahden poranäytteen massat yhdistettiin massan tiheyden määrittämistä varten, joten yhdestä laatasta saatiin kaksi massan tiheyttä. Näiden keskiarvoa käytettiin poranäytteiden tyhjätilojen laskennassa. Massan tiheydet määritettiin PANK:n ohjeiden mukaisesti /9/. Koelaatasta otettujen poranäytteiden keskiarvo laskettiin ja saatua arvoa käytettiin kyseisen laatan tyhjätila-arvona.

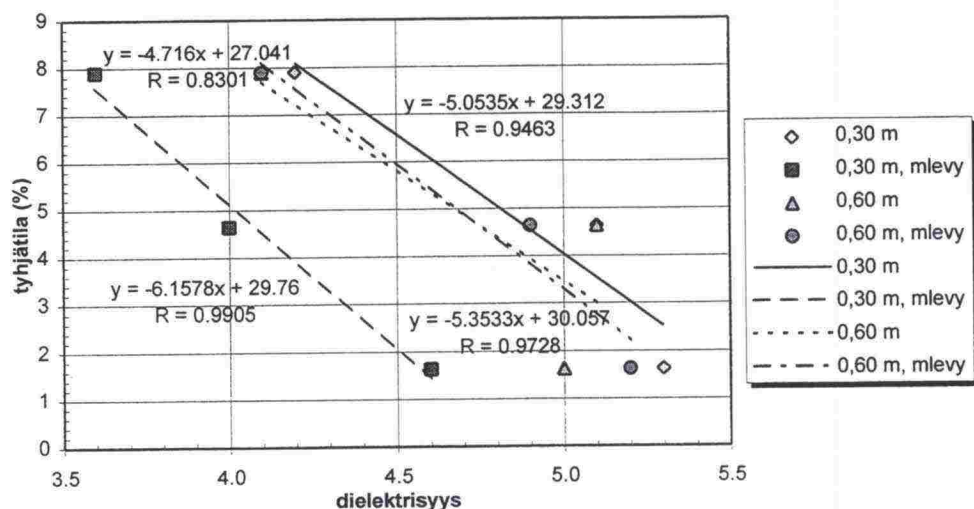
4.3.3 Tulokset ja niiden tarkastelu

Kuvassa 13 on esitetty sondimittausten dielektrisyysien ja laattojen tyhjätilojen välinen yhteys. Tulosten perusteella voidaan todeta, että AB-massasta tehdyillä laatoilla dielektrisyysien ja tyhjätilan välillä vallitsee selvä riippuvuus. Selitysaste on erittäin vahva. Sen sijaan SMA-massoilla ongelmaksi tulee SMA-massoille tyypillinen pinnan suuri karheus. Laatan pinnalta mitatut arvot ovat käytännössä samat riippumatta laatan tyhjätilasta ja korrelaatiota ei ole.

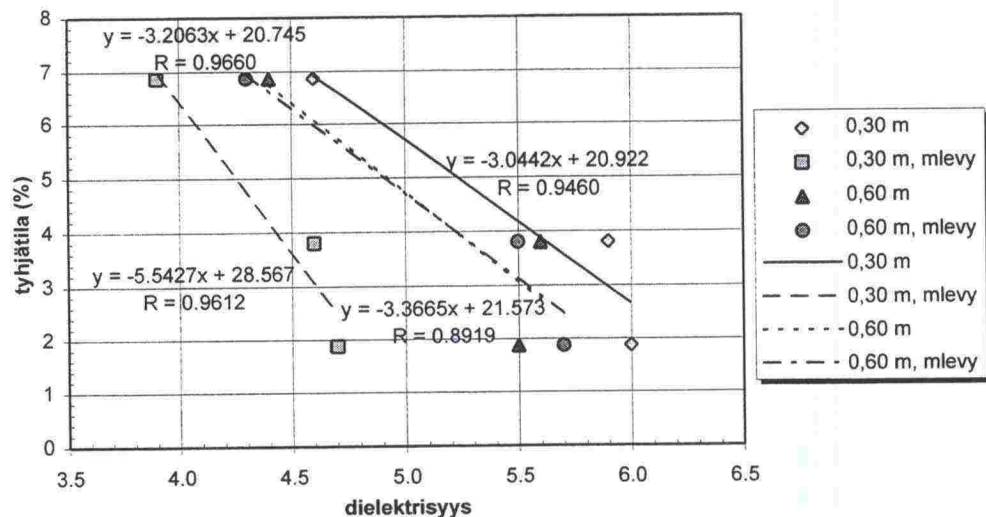


Kuva 13. Sondilla mitattujen dielektrisyysien ja poranäytteistä määritettyjen tyhjätilojen suhde koelaattamittauksissa.

Kuvissa 14 ja 15 on puolestaan esitetty tutkalla mitattujen dielektrisyysien ja poranäytteistä määritettyjen tyhjätilojen suhde. Kuvassa 14 ovat AB-laattojen tulokset ja kuvassa 15 SMA-laattojen tulokset. Tulokset ovat samansuuntaiset molemmilla laattatyypeillä.



Kuva 14. Tutkalla mitattujen dielektrisyyksien ja poranäytteistä määritettyjen tyhjättilojen suhde AB-laatoilla.



Kuva 15. Tutkalla mitattujen dielektrisyyksien ja poranäytteistä määritettyjen tyhjättilojen suhde SMA-laatoilla.

Korrelaatiot ovat vahvoja sekä AB-laatoilla että SMA-laatoilla. Tulokset ovat molemmilla laatoilla lähellä toisiaan lukuunottamatta 0,3 metrin mittauskorkeutta, kun metallilevy on laatan alla. Erojen perusteella voidaan päätellä, että 0,3 metrin mittauskorkeus on liian alhainen, koska metallilevy varautuu tutkan lähettämästä sähkömagneettisesta säteilystä vääristäen tuloksia. Onkin tärkeää, että mittauskorkeus pidetään riittävän korkeana (käytetty laitteisto on kalibroitu 480 mm:n korkeuteen) ja että mittauskorkeus pysyy vakiona mittauksesta toiseen.

Koelaattamittausten tulokset ovat hyvin samansuuntaiset kuin koekappalemittausten. Periaatteellista yhteyttä dielektrisyyden ja tyhjättilan välillä voidaan pitää oikeana. Lisäksi koekappalemittauksissa todettu sondin reagoi-

minen pinnan karkeuden vaihteluihin esiintyi myös koelaattamittauksissa. Sen sijaan tutka ei koelaattamittauksissa reagoinut pinnan karkeuden vaihteluihin, joten mittaustulokset sillä olivat SMA-laatoillakin hyviä. Lisäksi on huomattava, että sondilla mitatut ja tutkalla mitatut dielektrisyysarvot poikkeavat tasoltaan toisistaan, joten dielektrisyyksien absoluuttisten arvojen suoraan vertailua ei voida tehdä.

4.4 Laboratoriomittausten johtopäätökset

Laboratoriomittausten perusteella voidaan todeta, että lähtökohtana käytetty teoria dielektrisyiden kasvamisesta tyhjätilan pienentyessä on toimiva. Tämä käy ilmi sekä koekappale- että koelaattamittausten tuloksista. Korrelaatiot ja selitysasteet ovat yleisesti ottaen vahvoja. Lisäksi se, että sideainepitoisuuden vaihtelut eivät vaikuta dielektrisyteen mahdollistaa sen että sideainepitoisuutta ei tarvitse huomioida kenttämittauksia tehtäessä. Dielektrisyiden vaihtelut voidaan siis selittää pelkästään tyhjätilan muutosten perusteella.

Kuitenkin on huomattava, että tutkalla ja sondilla mitatut dielektrisyysarvot eivät suoraan vastaa toisiaan. Tämä johtuu siitä, että menetelmät perustuvat erilaisiin laskenta- ja mittaustekniikoihin. Lisäksi sondi reagoi selvästi pinnan karkeuteen. Ongelmaa on saatu pienennettyä uuden isomman sondin myötä, mutta ongelma on vieläkin olemassa.

5 KENTTÄMITTAUKSET

5.1 Yleistä

Kenttämittauksia tehtiin sekä kesällä -96 että kesällä -97. Mittauksissa pääpaino oli tyhjätilamääryyksissä sekä kesällä -97 myös paksuusmääryyksissä. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin joitakin pienempiä selvityksiä. Yhdellä kohteella (Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi) mitattiin seurantamittauksia tulosten toistettavuuden selvittämiseksi. Stabilointikohteissa puolestaan selvitettiin lähinnä stabiloinnin ja uuden päällysteen erottumista toisistaan.

5.2 Mittauskohteet

Kenttämittaukset suoritettiin kesien 1996-1997 aikana eri päällystystyökohteissa. Kiviainekset ja asfalttityypit olivat tiekohteissa pääasiassa vastaavia kuin koekappaleissa. Lisäksi tehtiin mittauksia kolmessa kohteessa, joissa käytetyissä massoista ei tehty koekappaleita. Kohteet sijaitsivat Lapin, Uudenmaan ja Oulun tiepiireissä (kuva 16). Tiekohteet pyrittiin valitsemaan siten, että mukana olisivat kattavasti Suomessa pääasiassa käytetyt päällystemassat. Uudenmaan tiepiirin SMA-kohteet valittiin mukaan SMA:n käytön lisääntyessä jatkuvasti. Oulun tiepiirin kohde oli tehty emulsiopäällysteestä ja yksi Lapin tiepiirin kohteista pehmeästä asfalttibetonista. Massoissa oli käytössä eri kiviaineksia ja eri maksimiraekokoja, joten tässäkin suhteessa massojen hajonta oli kattava.

Vt 1 Turun moottoritie, Espoo

Mittaukset tehtiin 30.7.1996. Kohteessa oli päällysteenä SMA 18 Koskenkylän murskeesta. Kohteen pituus oli 1,4 kilometriä. Ennen päällystystä oli tehty laatikkojyrsintä. Mitattiin oikean ajoradan ulkokaistan molemmat ajourat. Molemmista urista valittiin viisi pistemittauskohdetta, eli yhteensä kymmenen pistettä.

Mittauksia häiritsi sade. Static Shot -mittausten aikana alkoi pisaroida vettä, mutta ei vielä häiritsevästi. Sen sijaan sondimittauksia ei pystytty sateen vuoksi tekemään luotettavasti.

Vt 4 Korvala-Raudanjoki, Rovaniemen mlk/Sodankylä

Mittaukset tehtiin kahtena päivänä 16.-17.7.1996. Kohteen pituus oli 17,9 kilometriä. Massana oli AB 16 Vaiskokurun kalliomurskeesta. Ensimmäisenä päivänä mitattiin normaalit tutkimittaukset oikean kaistan molemmista ajourista. Toisena päivä tehtiin Static Shot- ja sondimittaukset. Ennen päällystämistä kohteessa oli tehty pinnan tasaus ja oikeaan profiiliin muotoilu. Pistemittauksia varten valittiin pisteitä molemmista ajourista yhteensä 12 kappaletta.

Vt 4 Raudanjoki-Vuojärven varalaskupaikka, Sodankylä

Kohde oli jatkoa edellisille kohteelle. Sen pituus oli 7,1 kilometriä. Massa oli sama AB 16 Vaiskokurun murskeesta. Kohteessa oli tehty perusparannus, joten vanhaa päällystettä ei ollut uuden alla. Varsinaisen kulutuskerroksen alla oli tasauskerros. Kohde oli kesän -97 seurantakohde. Ensimmäinen mittaus tehtiin 14.7.1997. Seurantamittaukset tehtiin 18.7.1997, 25.7.1997 sekä myöhään syksyllä 9.10.1997. Mittauksissa mitattiin oikean kaistan

ulkoura, josta valittiin kymmenen pistemittauskohdetta. Mitattiin myös päällysteen paksuus.

Vt 4 Vuotso, Sodankylä

Mittaukset tehtiin 26.8.1997. Tutkimuskohteen pituus oli 12,5 kilometriä. Kohteessa oli tehty tien perusparannus, joten mitattava päällyste oli suoraan kantavan kerroksen murskeen päällä. Mitattiin oikean kaistan ulkoura, josta valittiin kymmenen pistemittauskohdetta. Kohteessa tehtiin myös paksuusmittaukset.

Vt 21 Kangosjoki-Muonion kk, Muonio

Kohteessa oli tehty tien perusparannus. Massana oli AB 25, joka oli valmistettu Kuusajärven kalliomurskeesta. Kohteen pituus oli 8,4 kilometriä. Mittaukset tehtiin 27.8.1996. Mittaukset tehtiin oikean kaistan ulkourasta ja pistekohteita valittiin kymmenen kappaletta. Kohde oli ainoa kesän -96 kohteista, jossa tehtiin myös paksuusmittaukset.

Mt 45 Helsinki-Noppo, Tuusula

Kohde oli tutkimuksen toinen SMA-päällysteinen tie. Murskeena oli sama Koskenkylän murske kuin Vt 1:llä. Kohteella oli pituutta yksi kilometri ja mittaukset tehtiin 28.5.1997. Mitattiin oikean ajoradan sisäkaistan molemmat urat, joista molemmista valittiin viisi pistemittauskohdetta. Yhteensä oli siis kymmenen pistekohdetta. Kohteessa tehtiin myös paksuusmittaukset.

Mt 78 Törrönkoski-Alalivo, Pudasjärvi

Mittaukset tehtiin 14.8.1997. Päällysteenä oli emulsiopäällyste. Kohteessa oli tehty perusparannus, joten päällyste oli kantavan murskeen päällä. Päällysteen murskeena oli Palovaaran soramurske. Kohteesta mitattiin oikean kaistan ulkoura, josta valittiin kymmenen pistemittauskohdetta. Sondimittauksia kohteessa ei tehty.

Mt 9262 Anterovaara-Härkönen, Keminmaa

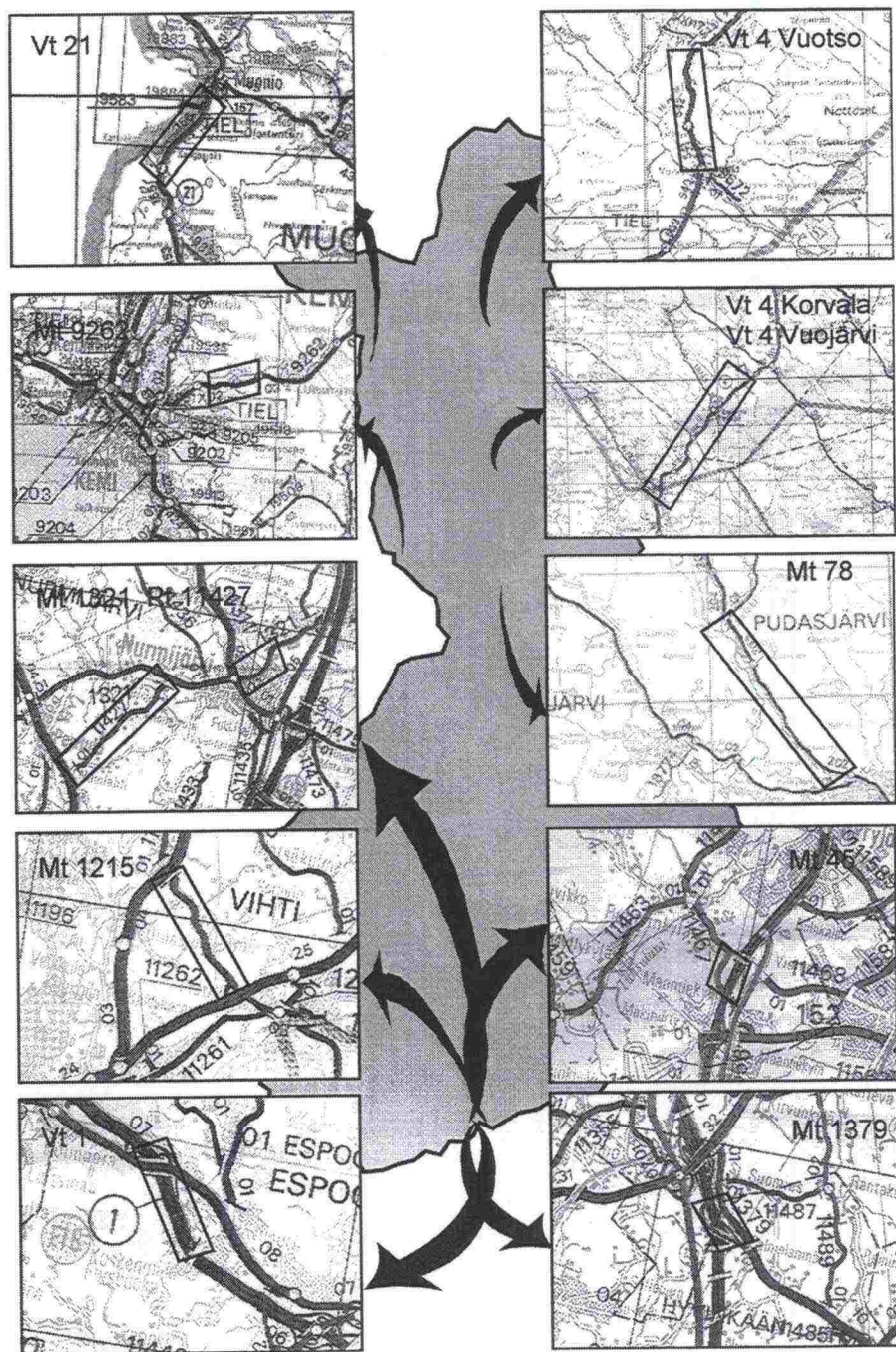
Kohde oli stabilointikohde eli päällysteen alle oli tehty Remixer-stabilointi. Päällysteen massana oli PAB-tyyppinen massa. Siitä ei tehty laboratoriossa koekappaleita. Kohteessa mitattiin oikean kaistan ulkoura, josta valittiin kymmenen pistemittauskohdetta. Mitattiin myös päällysteen paksuutta.

Pt 11427 Hongisojan paikallistie, Nurmijärvi

Kohteessa oli tehty paikoin vaahtobitumistabilointi. Päällysteenä oli AB 16 Latostenmaan soramurskeesta. Kohteesta, jonka pituus oli 4,8 kilometriä, mitattiin oikean kaistan ulkoura. Mittaukset tehtiin 30.7.1996. Pistekohteita valittiin kymmenen kappaletta. Aikaisemmin mittauspäivänä oli alueella satanut, mutta mittaushetkellä sää oli aurinkoinen ja tien pinta oli kuiva.

Muut kohteet

Maantie 1215:llä pääasiallinen tutkimuskohde vaahtobitumistabiloinnin erotuminen päällysteen alta. Lisäksi määritettiin tyhjätilat, mutta vertailunäytteitä ei otettu. Kohteen pituus oli 3,9 kilometriä. Maanteillä 1321 ja 1379 keskitettiin vertaamaan tutkatuloksia DOR-tuloksiin. Molempien kohteiden pituus oli yksi kilometri. Kaikki kolme kohdetta sijaitsivat Helsingin ympäristössä ja mittaukset tehtiin 15.9.1997.



Kuva 16. Kenttämittauskohteiden sijainnit

1.1 Mittausjärjestelyt

Kenttämittaukset tehtiin jokaisella tiekohteella samalla periaatteella. Aluksi mitattiin koko kohde läpi jatkuvana mittauksena päällystetutkalla. Alustavan tulosten tulkinnan ja tutkalla mitattujen dielektrisyysien määrittämisen jälkeen valittiin 10 pistekohtetta sondi- ja Static Shot -mittauksia varten. Pisteet valittiin siten, että dielektrisyysarvojen hajonta olisi mahdollisimman suuri. Lisäksi valituista pisteistä otettiin poranäyte ja pisteen vierestä noin 0,3 metrin päästä rinnakkaisnäyte. Poranäytteistä määritettiin tyhjätilat normaaleilla laboratoriomenetelmillä sekä lisäksi paksuudet mittanauhalla yhden millimetrin tarkkuudella. Paksuusmittauksia ei tehty vuoden -96 mittauksissa kuin valtatie 21:llä Muoniossa.

Tutkakalustona oli käytössä sama SIR 10H -laitteisto kuin koelaattamittauksissa. Antennina oli myös sama 1000 MHz:n kartiotorviantenni. Mittauksissa ajettiin noin 40-60 km/h nopeudella yhtäjaksoisesti läpi koko mitattava kohde. Lopuksi mitattiin täysheijastuksen amplitudi metallilevystä. Lisäksi mitattiin ilmasta pulssi siten, että antennipari käännettiin ylösalaisin ja suoritettiin mittausta. Ilmapulssin avulla voidaan tutkadatasta eliminoida ympäristön aiheuttamat häiriöt. Lopputuloksena tutkamittauksesta saadaan jatkuva profiili dielektrisyysistä ja paksuuksista. Kuvassa 17 on näkyvissä käytetty tutka-auto ja mittausjärjestelyt. Auton edessä näkyy hyvin antennipari, joista etummainen on lähettävä ja taaempi vastaanottava-antenni.



Kuva 17. Mittauksissa käytetty mitta-auto ja mittausjärjestelyt.

Tutkalla saatujen dielektrisyysarvojen perusteella valittiin pistekohteet. Paikat pyrittiin valitsemaan siten, että pisteiden dielektrisyys vaihtelivat tasaisesti kohteen suurimman ja pienimmän arvon välillä. Lisäksi paikkojen valinnassa tuli huomioida, että jatkuvan profiilin dielektrisyysarvo säilyi vähintään viiden metrin matkalla suunnilleen saman suuruisena. Näin pyrittiin välttämään ottamasta mukaan mahdollisten virhelähteiden aiheuttamia yksittäisiä arvoja. Pisteestä mitattiin päällystetutkalla dielektrisyys Static Shot-menetelmällä. Static Shot -mittauksella tarkoitetaan dielektrisyysarvon määrittämistä siten, että auto pysäytetään, päällystetutkan antennipari

kohdistetaan valittuun pisteeseen ja mitataan. Auton ollessa paikallaan voidaan mitata ilman ulkoisia häiriötekijöitä.

Dielektrisyyssondimittaukset tehtiin heti Static Shot -mittausten jälkeen samasta pisteestä. Mittauksia tehtiin yhdestä pisteestä kuusi kappaletta. Mittausten välissä sondia siirrettiin eri kohtiin. Tulokset tulkittiin siten, että suurin ja pienin mittaustulos jätettiin pois. Jäljelle jääneistä arvoista laskettiin keskiarvo, joka valittiin vastaamaan pisteen dielektrisyysarvoa.

Poratuista näytteistä tutkittiin laboratoriossa niiden tyhjätilat. Jokaiselle kappaleelle määritettiin erikseen päällysteen tiheys. Päällysteen tiheyden mittaamiseen käytettiin AB-tyyppisillä päällysteillä ilmavesipunnitusmenetelmää PANK:n ohjeen n:o 4110 mukaisesti /9/. SMA -tyyppisillä näytteillä sen sijaan päällysteen tiheys määritettiin imeytys-pintakuivausmenetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4112 mukaisesti /9/. Massan tiheyden määrittämistä varten rinnakkaiskappaleet yhdistettiin riittävän massamäärän saavuttamiseksi. Massan tiheys määritettiin Ricen-menetelmällä PANK:n ohjeen n:o 4109 mukaisesti /9/.

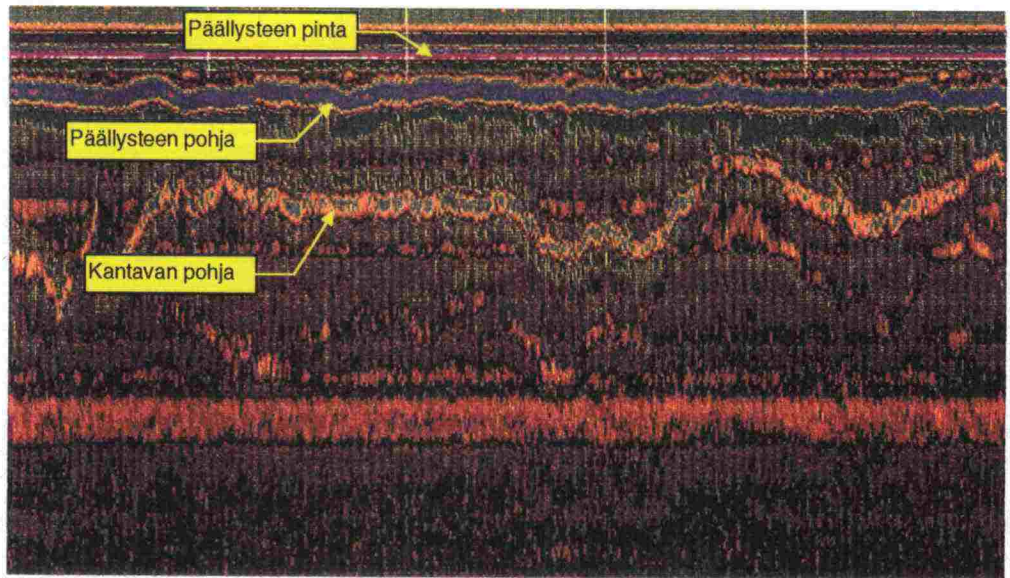
DOR-vertailuja varten mitattiin kahdessa kohteessa (Mt 1323 ja Mt 1379) samanaikaisesti sekä tutkalla että DOR-mittauslaitteistolla. Mittaukset aloitettiin ja lopetettiin samaan pisteeseen ja mittaukset tehtiin noin metrin etäisyydeltä oikean kaistan päällysteen reunasta. Näin voitiin vertailla tutkalla mitattuja ja DOR-laitteistolla mitattuja jatkuvia profiileja.

Kohteista otettiin molemmista kahdesta pisteestä poranäytteet, joista määritettiin tyhjätilat normaalisti laboratoriossa. Lisäksi kesän -96 kohteissa oli tehty DOR-mittaukset normaalina laadunvalvontana. Nämä tulokset olivat myös käytössä DOR-vertailuissa niiltä osin, kun pistemittauskohteet osuivat näiden mittausten kohdille. Näissä pisteissä voitiin vertailla niin tutkatuloksia kuin DOR-tuloksia poranäytteistä määritettyihin tyhjätiloihin.

5.4 Tulokset

5.4.1 Dielektrisyysmittaukset

Päällystetutkimituksen tuloksena saadaan datan käsittelyn ja tulkitsemisen jälkeen päällysteen dielektrisyysarvot ja paksuusarvot 0,5 metrin välein. Kuvassa 18 on tyypillistä tutkadataa Muoniosta. Kuvasta näkyy hyvin päällysteen pohjan lisäksi kantavan kerroksen pohja. Päällysteen dielektrisyysmäärittämistä varten rajapintojen ei tarvitse näkyä, vaan dielektrisyysarvot voidaan laskea ilman rajapintojen tulkitsemista. Liitteellä 3 on esitetty esimerkkinä jatkuvan profiilin kuvia valtatie 4:ltä Vuotsosta. Samoissa kuvissa on esitetty myös kohteen pistemittausten Static Shot- ja dielektrisyyssonditulokset.



Kuva 18. Tyypillistä tutkadataa valtatie 21:ltä Muonion tiekohteelta.

Taulukkoon 5 on koottu tutkimittausten tulokset. Siinä on esitetty kohteittain koko datasta lasketut dielektrisyysien ja paksuuksien keskiarvot ja keskihajonnat. Pelkästään dielektrisyysien perusteella voidaan jo tehdä päätelmiä päällysteen tasalaatuisuudesta. Jos dielektrisyysien hajonta on suuri, niin myös tyhjätilojen hajonta on suuri. Jatkuvan mittauksen tulosten lisäksi taulukossa on esitetty myös Static Shot -mittausten ja sondimittausten tulokset. Sondimittauksissa on huomioitava, että kesän -96 mittauksissa on käytetty vanhaa sondia. Laboratoriomittausten yhteydessä todettiin, että sondit antavat hieman eritasoisia tuloksia. Kaikki pistemittauksien tulokset on esitetty liitteellä 4.

Taulukko 5. Kohteittain mitatut dielektrisyysien keskiarvot ja keskihajonnat

kohde	jatkuva mittaus		Static Shot		sondi	
	ka	khajonta	ka	khajonta	ka	khajonta
Vt 1	4,38	0,22	4,56	0,15	-	-
Vt 4 Korvala	4,21	0,15	4,53	0,09	4,0	0,2
Vt 4 Vuojärvi	4,18	0,26	4,18	0,03	3,8	0,2
Vt 4 Vuotso	4,15	0,16	4,36	0,13	4,5	0,3
Vt 21	4,54	0,18	4,02	0,16	3,6	0,4
Mt 45	4,18	0,16	4,40	0,29	3,6	0,2
Mt 78	4,61	0,15	5,09	0,20	-	-
Mt 9262	3,38	0,31	-	-	-	-
Pt 11427	4,23	0,15	4,69	0,11	4,7	0,3

Pistemittausten tulosten vertailua varten laskettiin jatkuvan mittauksen tuloksista pisteen dielektrisyttä varten kolmen metrin keskiarvo, joka valittiin pisteen dielektrisyysiksi. Tämä tehtiin siksi, että matkan mittauksessa tulee aina metristä muutamaan metriin olevia eroja. Kolmen metrin keskiarvon voidaan olettaa kuvaavan hyvin pistekohteen dielektrisyysarvoa, vaikkakin pistemäisiä vaihteluita on havaittu.

Static Shot -mittausten ja jatkuvan mittauksen pistekohteiden arvot vastaavat pääasiassa hyvin toisiaan. Korrelaatiot ovat kohteittain tarkasteltuna hyviä. Vain Vt 4:llä Vuojärvellä ja Pt 11427:llä Hongisojan paikallistiellä korrelaatiot

jäävät selvästi alemmaksi kuin muilla kohteilla. Syynä tähän on pääasiassa tulosten hajonnan pienuus, esim. Vuojärven kohteen dielektrisyysien hajonta oli vain 0,03 yksikköä.

5.4.2 Poranäytteet

Poranäytteistä mitattiin tyhjätilat laboratoriossa ja paksuudet kesän -97 kohteiden sekä Muonion kohteen poranäytteistä. Mittaustulokset ovat *liitteellä 5*. Taulukkoon 6 on koottu kohteiden tyhjätilojen ja paksuuksien keskiarvot ja keskihajonnat.

Taulukko 6. Tyhjätilojen ja paksuuksien keskiarvot ja keskihajonnat kenttämittauksissa.

kohde	tyhjätila (%)		paksuus (mm)	
	keskiarvo	keskihajonta	keskiarvo	keskihajonta
Vt 1	4,6	1,1	-	-
Vt 4 Korvala	2,9	0,7	-	-
Vt 4 Vuojärvi	4,0	0,6	95	10
Vt 4 Vuotso	3,7	0,7	44	10
Vt 21	1,6	0,4	56	6
Mt 45	4,0	1,0	50	3
Mt 78	6,4	1,3	51	4
Mt 9262	9,4	1,2	49	16
Pt 11427	1,9	0,8	-	-

5.4.3 Seurantamittaukset

Seurantamittauksia tehtiin VT 4:llä välillä Raudanjoki-Vuojärvi. Mittaukset toistettiin neljä kertaa. Kolme ensimmäistä mittausta tehtiin kahden viikon kuluttua päällystyksestä. Vielä tuntia ennen kolmatta mittausta tien pinta oli kostea, mutta mittauksen alkaessa tien pinta oli silmämääräisesti kuiva. Viimeinen mittaus tehtiin myöhään syksyllä syyssateiden jälkeen. Viimeisessä mittauksessa jouduttiin käyttämään mittauksissa eri autoa kuin tavallisesti. Tässä mittauksessa antennin korkeus oli noin viisi senttimetriä alempi kuin muissa mittauksissa.

Seurantamittauksen dielektrisyysien profiilit on esitetty *liitteellä 6*. Kolmen ensimmäisen mittauksen tulokset ovat keskenään hyvin samantyyppiset. Kolmannessa mittauksessa joissakin paikoissa näkyy kosteuden vaikutus korkeampana dielektrisyysinä. Profiilit noudattavat kuitenkin toisiansa pääpiirteittäin hyvin (kts. liite 6).

Neljännän mittauksen dielektrisyydet ovat selvästi alempia kuin kolmen aikaisemman mittauksen (kts. liite 6). Tämä johtunee alemmasta mittauskorkeudesta. Sama ilmiö havaittiin koelaattamittausten yhteydessä käytetäessä 30 cm:n mittauskorkeutta (kts. kuvat 14 ja 15). Seurantamittauksen havainto vahvistaa mittauskorkeuden merkityksen tuloksiin, joten antennin korkeuden vakioimiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kuitenkin tulee huomata, että neljännän mittauksen tuloksissa ei ole selviä poikkeamia kolmen aikaisemman mittauksen tuloksiin, vain dielektrisyystaso on eri kuin aikaisemmissa mittauksissa.

5.4.4 Stabilointikohteet

Tavoitteena oli selvittää stabilointikohteissa stabiloinnin ja uuden päällysteen rajapinnan erottuminen. Stabilointikohteita oli mittauksessa Mt 9262 Antero-vaara-Härkönen, jossa oli tehty Remixer-stabilointi. Toisena kohteena oli Mt 1215 Palojärvi-Ollakka, jossa oli osittain vaahtobitumistabiloitu.

Molemmissa kohteissa stabiloinnin ja päällysteen rajapinta erottui tutka-datasta, joten uuden päällystekerroksen tulkinta oli mahdollista. Vaahtobitumistabiloinnin ja kantavan kerroksen murskeen rajapinta sen sijaan oli heikko. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä päällysteen paksuuden määrittämisessä, koska päällysteen pohjan ja stabiloinnin rajapinta erottui tutka-kuvasta.

6 TULOSTEN ANALYSOINTI

6.1 Tyhjätilamittaukset

6.1.1 Yleistä

Kesän -96 tutkimusraportissa /11/ todettiin, että laitteistoja ei voida käyttää päälysteiden tyhjätilamäärittäykseen riittävällä tarkkuudella. Ongelmaksi tutkimuksessa oletettiin vesi ja sen vaikutus mittaustuloksiin. Tältä pohjalta lähdettiin tekemään myös jatkotutkimusta.

Vuoden -96 tutkimusta tehtäessä havaittiin, että käytetty ns. korkeuskorjaustiedosto ei toiminut toivotulla tavalla. Mitattaessa auton eteen sijoitettu antenni heiluu pystysuunnassa ilmapinnan ja pinnan epätasaisuuksien vaikutuksesta. Korkeuskorjaustiedostoa tarvitaan tutkadatan prosessoinnissa antennin heilunnan poistamiseen. Analysoinnissa todettiin, että käytetyllä korkeuskorjauksella dielektrisyysarvot korreloivat selvästi antennin heilunnan kanssa. Tämän vuoksi tehtiin erinäisiä testejä ja todettiin, että toisella olemassa olevalla korkeuskorjaustiedostolla heilunnan ja dielektrisyysarvojen riippuvuutta ei esiintynyt. Samalla todettiin, että veden vaikutus mittaustuloksiin oli oletettu liian suureksi.

Toinen muutos, joka on tehty tässä tutkimusraportissa kesän -96 tutkimusten raporttiin /11/ verrattuna, oli tutkatulosten perusteella määritettyjen dielektrisyyksien muuttamisessa tyhjätiloiksi. Menetelmän periaatetta muutettiin suuntaan, jota voitaisiin käyttää myös käytännössä. Tämä myös vaikutti tyhjätilojen korrelointiin. Uusi laskentamenetelmä on esitetty myöhemmin tässä raportissa.

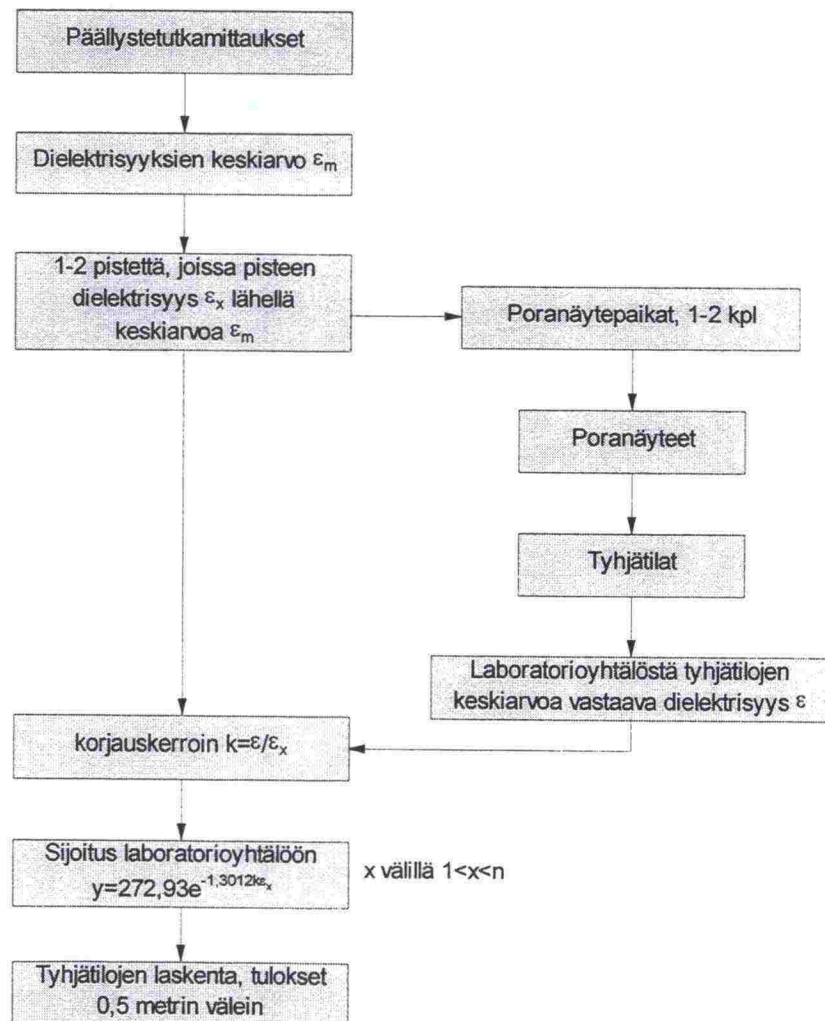
Koska vuoden -96 tulosten prosessoinnissa oli havaittu selvä virhelähde ja koska tyhjätilojen laskentamenetelmää muutettiin, niin päätettiin käsitellä vuoden -96 kenttämittaukset uudestaan käyttäen uutta ja toimivaa korkeuskorjaustiedostoa. Tehtyjen mittausten käsittelyjen jälkeen tulokset paranivat selvästi verrattuna vuoden -96 tutkimusraportin /11/ tuloksiin. Myöskään veden erityistä vaikutusta tuloksiin ei ollut enää havaittavissa, vaan ongelmat olivat johtuneet pääasiassa käytetystä korkeuskorjaustiedostosta eivätkä vedestä. Tämän vuoksi tässä raportissa on esitetty uudelleen käsitellyt tulokset ja näiden perusteella tehdyt johtopäätökset.

Kuitenkin tulee muistaa, että vedellä on dielektrisyteen selvä vaikutus. Mittauksia ei siis voida tehdä, kun tien pinta on märkä tai kostea. Sateella mittaamisen estää myös laitteiston rikkoontumisen vaara.

6.1.2 Tyhjätilojen laskennan periaatteet

Laskennan lähtökohtana oli käyttää menetelmää, joka olisi kilpailukykyinen ja luotettava. Lisäksi sen käytön olisi oltava helppoa ja nopeaa. Menetelmäksi valittiin laboratoriokokeisiin perustuva menetelmä. Perustana menetelmässä on, että käytetään tyhjätilojen laskennassa hyväksi laboratoriokokeisiin perustuvaa yhtälöä.

Koska päällysteen dielektrisyys on sen komponenttien funktio, päällysteen keskimääräisen dielektrisyys tason vaikuttaa päällysteessä käytetyn murskeen dielektrisyysarvo. Lisäksi funktio on määritetty käyttämällä mittauksissa dielektrisyyssondia, jolla mitatut dielektrisyys poikkeavat hie-
man tutkalla mitatuista. Myös mittausolosuhteet ja muutokset mittausjärjes-
telyissä saattavat vaikuttaa keskimääräiseen dielektrisyystasoon. Tämän
vuoksi laskentaa varten täytyy päällystekohteesta porata yhdestä kahteen
poranäytettä keskimääräistä dielektrisyttä vastaavista pisteistä. Pora-
näytteet otetaan siis valituista pisteistä tutkimittautulosten alustavan käsit-
telyn jälkeen. Käsitteilyssä lasketaan koko kohteen mitattujen dielektrisyys-
sien keskiarvo. Keskimääräistä dielektrisyttä vastaavista pisteistä porataan
näytteet, joista määritetään tyhjätilat normaaleilla laboratoriomenetelmillä.
Poranäytetulosten ja keskimääräisen dielektrisyysden avulla määritetään
laboratoriossa määritettyyn yhtälöön mitatuille dielektrisyysille korjaus-
kerroin. Korjauskertoimen avulla saadaan siis kohteessa mitatut dielektri-
syys vastamaan laboratoriokokeissa määritettyjä dielektrisyys, jolloin
laboratoriossa määritetyn funktion käyttö on mahdollista. Kuvassa 19 mene-
telmän kulku on esitetty kaaviokuvana.

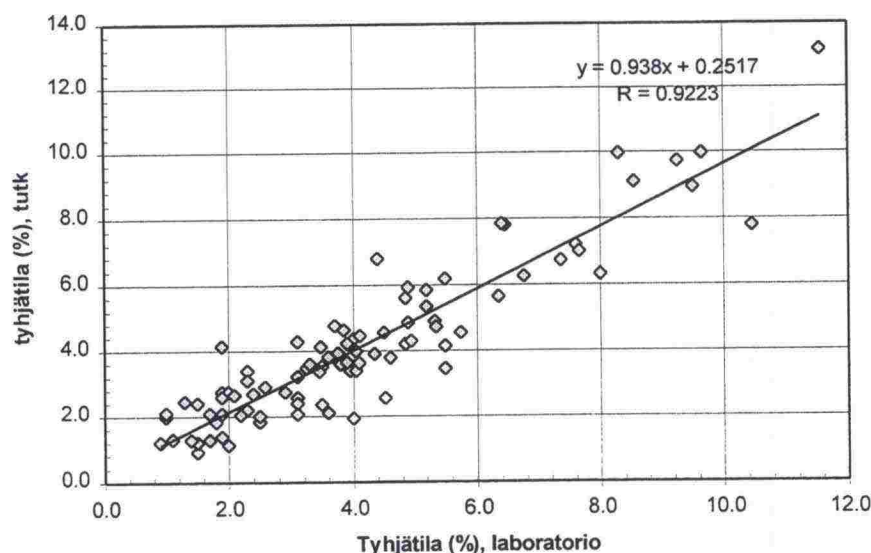


Kuva 19. Kaaviokuva tyhjätilojen laskennasta dielektrisyysarvojen perusteella.

Sonditulosten laskenta on periaatteeltaan vastaava. Erona on kuitenkin se, että dielektrisyysien keskiarvo lasketaan pistekohteiden mittaustuloksista. Näin otos on suppea, mutta kuitenkin suuntaa antava.

6.1.3 Kenttämittaus- ja poranäytetulosten vertailu

Mittaustuloksia on verrattu pistemittauskohteiden tulosten avulla. Kuvassa 20 on esitetty laboratoriossa määritettyjen ja tutkalla määritettyjen tyhjätilojen suhde. Pistemittauskohteiden tulokset on esitetty liitteellä 5. Vertailussa on käytetty tutkamittaustuloksina jatkuvasta mittauksen tuloksista laskettuja kolmen metrin keskiarvoja.

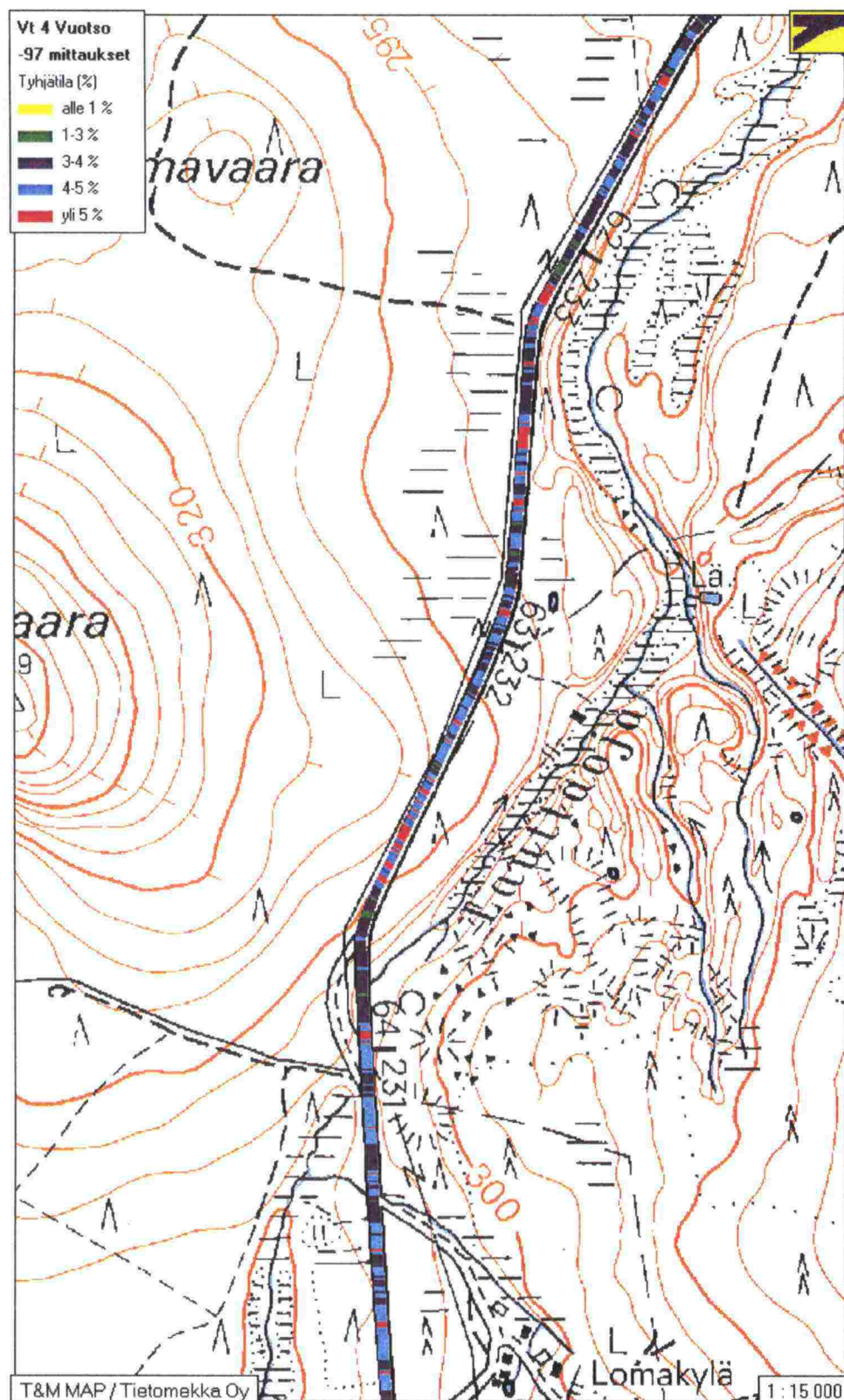


Kuva 20. Porapaloista mitattujen tyhjätilojen ja päällystetutkalla mitattujen tyhjätilojen suhde

Tulosten perusteella voidaan todeta, että tutkalla mitatut tyhjätilat vastaavat hyvin poranäytteiden tyhjätiloja. Korrelaatio R on menetelmien välillä vahva. Tutkamittausten keskivirhe verrattuna poranäytetuloksiin on 0,9 prosenttiyksikköä. Pistekohteiden tutkalla mitattujen tyhjätilojen keskiarvo on 4,1 prosenttia. Lisäksi voidaan todeta, että tutkatulosten tyhjätilojen absoluuttiset arvot noudattavat erittäin hyvin poranäytteiden tyhjätiloja. Sovitetun suoran kulmakerroin on lähellä yhtä ja vakio on lähellä nollaa.

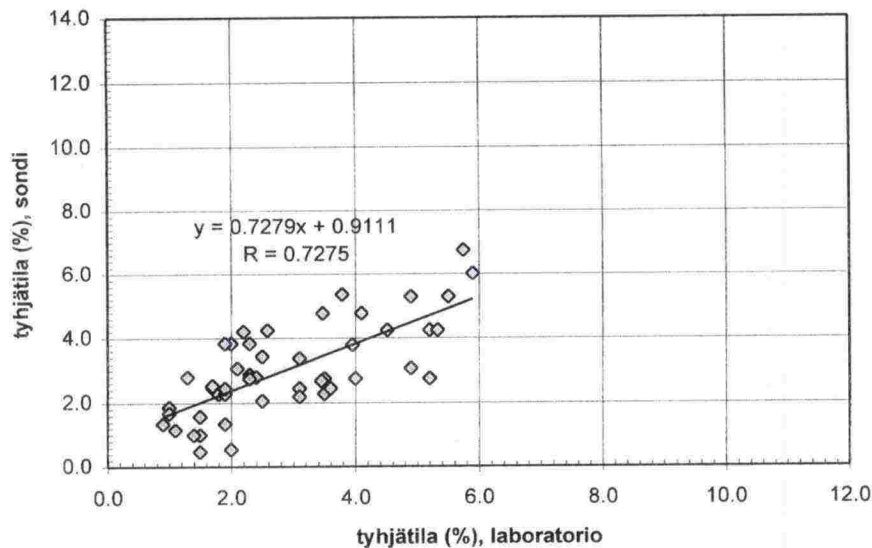
Kohteissa, joissa Asfalttinormien [2] mukaan on periaatteelliset raja-arvot, on laskettu ylitys- ja alitusprosentit työkohteissa. Liitteellä 7 on esitetty vertailuksi poranäytetulosten avulla lasketut ylitys- ja alitusprosentit. Tulosten perusteella nähdään, että ylitys- ja alitusprosentit vastaavat eri menetelmillä hyvin toisiaan.

Tutkatulokset voidaan esittää usealla eri tavalla. Kuvassa 21 on T&M Map-ohjelman avulla piirretyt tulokset VT 4:ltä Vuotson kohteelta. Karttaesitys on informatiivinen, siitä näkee heti esimerkiksi alueet, joissa tyhjätila on suuri. Muita mahdollisia esitysmuotoja on vastaava graafinen esitys kuten kuvassa 26 on esitetty paksuusmittauksille. Lisäksi tulokset voidaan esittää numeerisesti 0,5 metrin välein.



Kuva 21. T&M Map-ohjelmalla esitetyt tyhjättilan arvot Vt 4:ltä Vuotsosta.

Poranäytetulosten ja sondilla mitattujen tyhjättilojen välinen suhde on esitetty kuvassa 22. Vertailu on tehty vastaavasti kuten tutkatulosten vertailussa. Sondilla mittauksista ei saada lopputuloksena jatkuvaa profiilia kohteesta, vaan mittaus on pistemäinen.



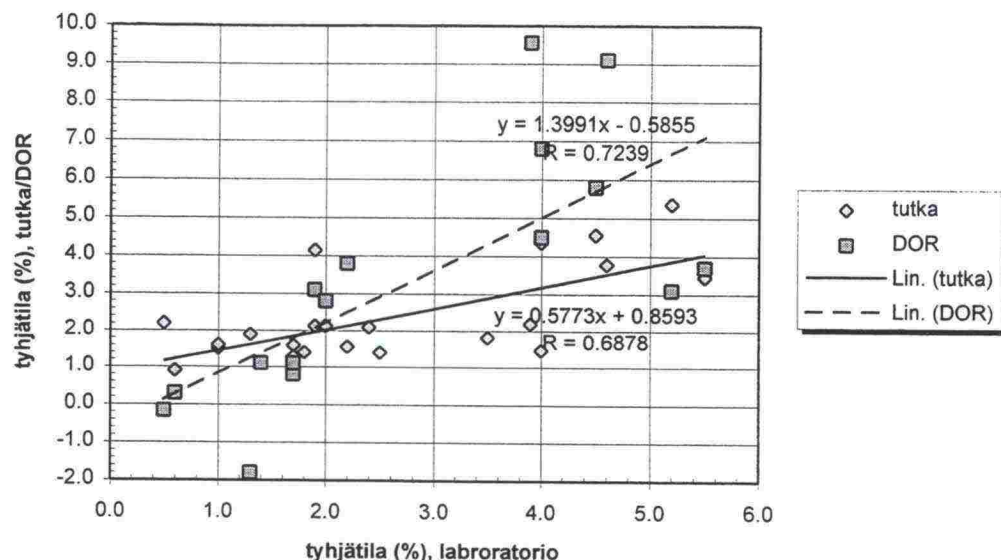
Kuva 22. Laboratoriossa ja sondilla määritettyjen tyhjättilojen suhde.

Sonditulosten korrelaatio R jää keskimertaiseksi. Myös keskivirhe on heikempi kuin tutkalla mitattaessa. Keskivirhe on 1,1 prosenttiyksikköä. Vertailussa on mukana vähemmän pisteitä kuin tutkimittauksessa, mutta otos on kuitenkin kattava. Sondilla mitattujen tyhjättilojen keskiarvo on 3,4 prosenttia.

6.1.4 Tutkamittaustulosten ja DOR-mittaustulosten vertailu

Tutkimuksessa voitiin tutkamittausten ja DOR-mittausten tuloksia vertailla kahdella eri tavalla. Osassa pistemittauskohteita oli tehty normaalina laadunvalvontana DOR-mittaukset, joiden tuloksista voitiin laskea pisteen kohdalta tulosten kolmen metrin keskiarvo vastaavasti kuten tutkatuloksista. Toisessa menetelmässä mitattiin kahdessa eri kohteessa (Mt 1321 ja Mt 1379) täsmälleen sama jakso yhtäaikaan sekä tutkalla että DOR-laitteistolla. Näin tuloksia voitiin vertailla keskenään koko kohteen matkalta.

Pistemittauksissa tuloksissa on mukana sekä kesän -96 mittauksia että kesän -97 mittauksia. Tuloksia voidaan vertailla sekä poranäytteiden tuloksiin että keskenään. Kuvassa 23 on esitetty molempien menetelmien suhde poranäytteisiin pisteissä, joista oli tulokset kaikilla kolmella menetelmällä.



Kuva 23. Tutka- ja DOR-tulosten suhde poranäytetuloksiin.

Molemmilla menetelmillä tulokset jäävät vähäisessä otoksessa keskinkertaiseksi. Tutkatulosten keskivirhe on sen sijaan selvästi pienempi kuin DOR-tulosten. Tutkatuloksissa keskivirhe on 0,9 prosenttiyksikköä, kun DOR-tulosten keskivirhe on peräti 2,3 prosenttiyksikköä. Lisäksi on huomattava, että kaksi DOR-tulosten arvoa on negatiivisia.

Vertailtaessa keskenään tutka- ja DOR-tuloksia korrelaatio jää heikoksi sekä pistekohteiden avulla tutkittuna että kahden kohteen tulosten vertailulla. Pistekohteiden korrelaatio menetelmien välillä jää heikoksi. Samoin vertailtaessa Mt 1321:n ja Mt 1379:n tuloksia, niin voidaan todeta, ettei menetelmien välillä ole yhteyttä. Korrelaatiota ei tulosten perusteella ole lainkaan.

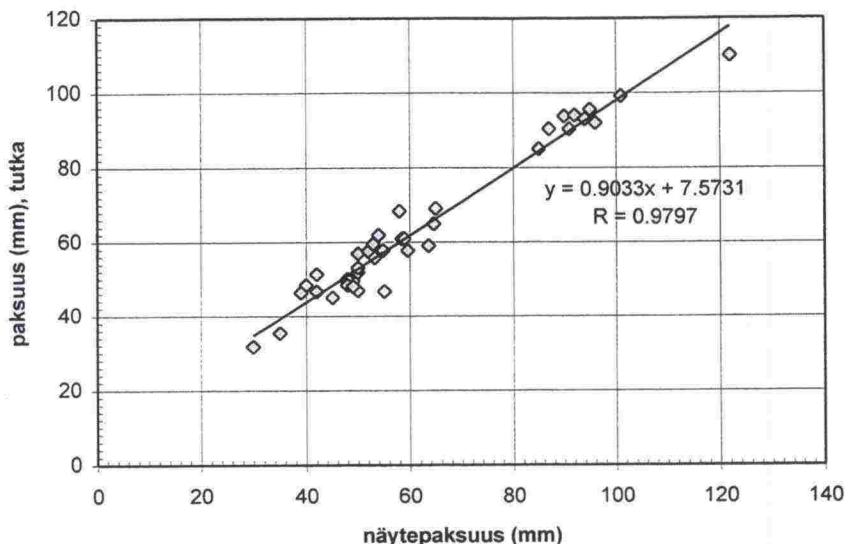
6.2 Paksuusmittaukset

6.2.1 Yleistä

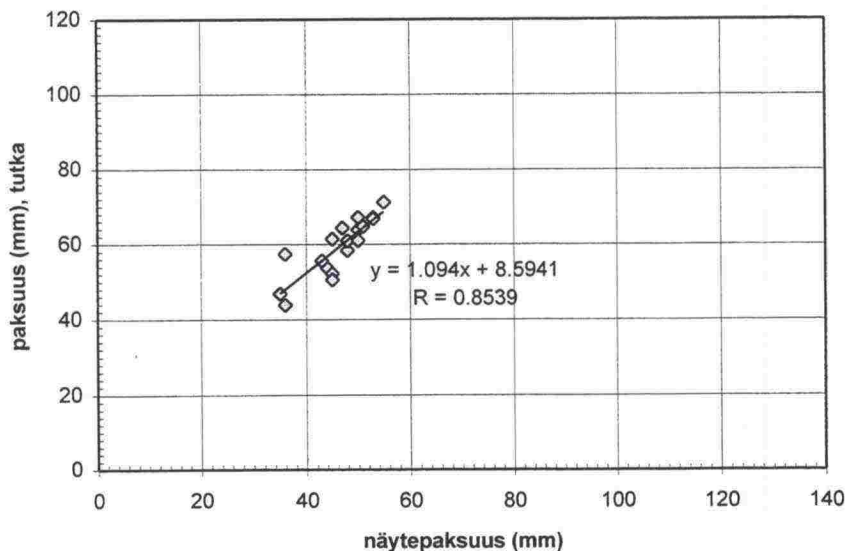
Paksuusmittauksia tehtiin lähinnä kesän -97 aikana. Lisäksi Vt 21:llä Muoniossa tehtiin paksuusmittaukset kesällä -96. Paksuuden määrittämistä varten tutkadatasta sen prosessoinnin jälkeen täytyy tulkita päällysteen pohjan rajapinta (kts. kuva 18). Tulkinnan jälkeen ohjelma laskee paksuuden päällysteen pinnasta tulkittuun rajapintaan. Jos rajapinta on selvä, on tulkitseminen helppoa ja nopeaa. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi perusparannetut kohteet. Sen sijaan jyrskyillä alustoilla uuden päällysteen rajapinnan erottaminen saattaa olla vaikeaa tai jopa mahdotonta 1 GHz:n antennilla.

6.2.2 Paksuusmittaustulosten vertailu

Tutkalla mitattuja paksuuksia vertailtiin poranäytteiden paksuuksiin. Tutka-mittausten tuloksista on laskettu pistekohteen ympäriltä kolmen metrin keskiarvo kuten laskettiin tyhjätilamääritysten yhteydessä. Paksuusmittausten tulokset on esitetty kuvissa 24 ja 25. Niissä on esitetty erikseen korrelaatiot sitomattomille alustoille ja sidotuille alustoille. Pistekohtaiset tulokset ovat liitteellä 5.



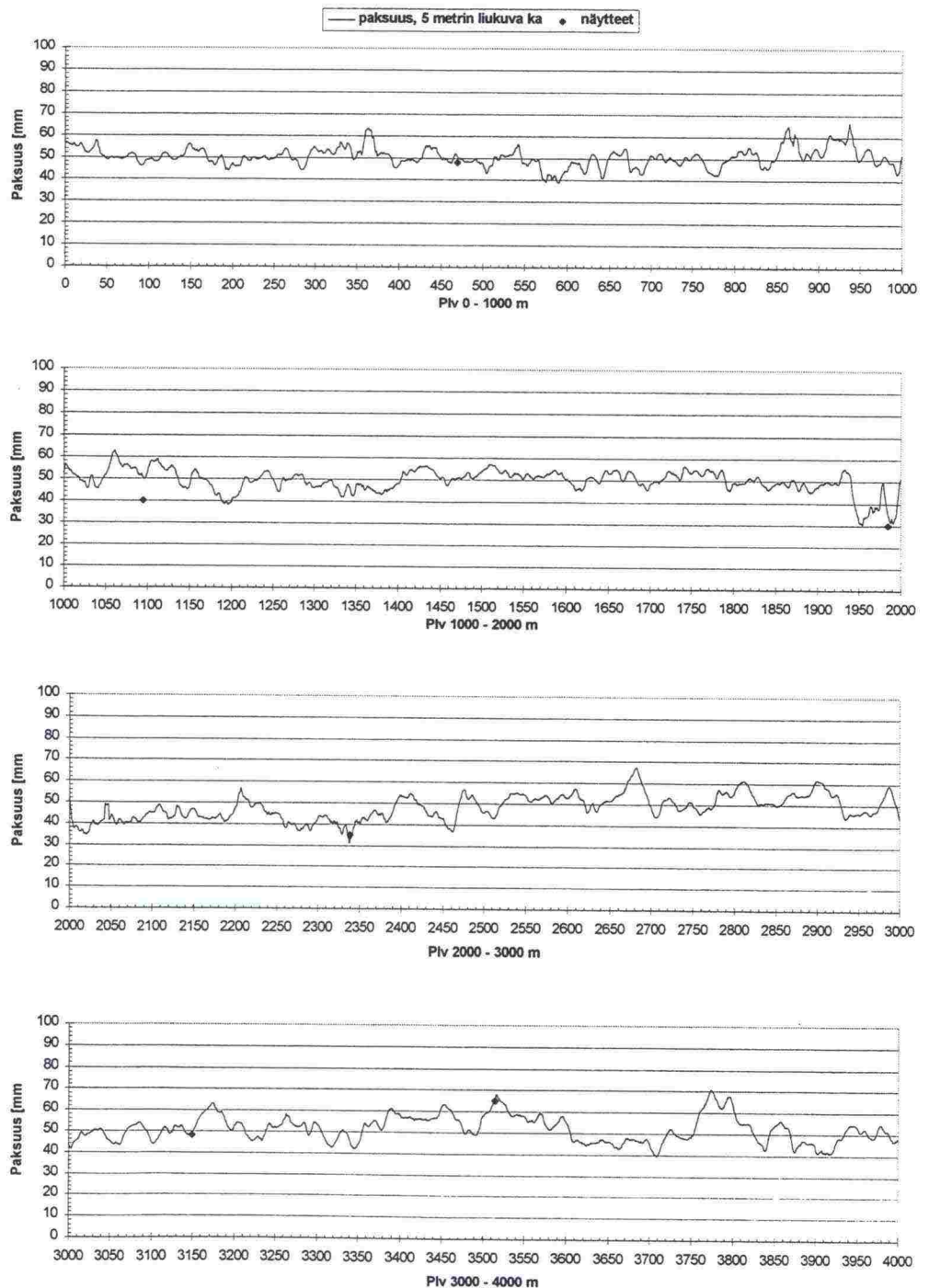
Kuva 24. Näytepaksuuksien ja tutkalla mitattujen paksuuksien suhde sitomattomalla alustalla.



Kuva 25. Näytepaksuuksien ja tutkalla mitattujen paksuuksien suhde sidotulla alustalla.

Korrelaatio tutkatulosten ja näytepaksuuksien välillä on vahva sekä sitomattomilla että sidotuilla alustoilla. Tuloksista nähdään myös, että ohuilla päällysteillä tutkalla mitatut paksuudet ovat hieman suurempia kuin näytepaksuudet. Absoluuttisten erot eivät kuitenkaan ole suuria. Sidotulla alustalla tulosten hajonta on selvästi pienempi kuin sitomattomalla, mikä selittää osaksi hieman heikompaa korrelaatiota näytepaksuuksiin verrattuna. Keski-
virhe paksuusmittauksissa on molemmilla alustoilla 4 mm.

Paksuusmittauksen selvä etu normaaleihin menetelmiin on, että tutkimuksen avulla paikallistetaan työkohteelta alueet, joissa päällystepaksuudet ovat ohuet. Jos halutaan varmistaa tutkimustulos, voidaan näytteenotto ohjata ohueksi mitattuihin kohtiin. Lisäksi on huomattavaa, että tutkalla saadaan koko kohteesta paksuustiedot puolen metrin välein, joten mittauksen kattavuus on muihin menetelmiin verrattuna selvästi parempi. Kuvassa 26 on esitetty kaaviokuvana neljän ensimmäisen kilometrin päällystepaksuudet Vt 4:ltä Vuotosta.



Kuva 26. Esimerkki jatkuvan profiilin esitystavasta Vt 4:ltä Vuotosta.

Kuvasta 26 on helppo havaita paikat, joissa päällyste on ohut. Esimerkiksi Vuotsossa alle 30 mm:n päällystettä tutkatulosten perusteella on yhteensä kuuden metrin matkalla. 30-40 mm:n paksua päällystettä on tutkatulosten perusteella 389 metrin matkalla. Koko kohteen pituus oli noin 12,5 kilometriä. Toinen tulosten esitystapa on GIS-karttapohja vastaavalla tavalla kuin kuvassa 21 on esitetty tyhjätilan arvot. Lisäksi tulokset voidaan esittää numeerisesti 0,5 metrin välein.

Paksuusmittauksissa saattaa olla sidotuilla alustoilla ongelmia uuden ja vanhan päällysteen rajapinnan erottumisessa. Ongelma esiintyy, kun vanhan ja uuden päällysteen dielektriset ominaisuudet ovat hyvin lähellä toisiaan tai alusta on jyrstetty. Lisäksi tasauskerroksen ja uuden päällysteen rajapinnan erottaminen on usein mahdotonta.

7 MUUT TUTKIMUKSET

7.1 Yleistä

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin myös muita tutkimuksia, joiden tulokset eivät olleet lupaavia tai eivät antaneet lisänformaatiota toivotulla tavalla. Tällaisia tutkimuksia olivat mm. jäykkyysmoduulin ja dielektrisyyden väliset tutkimukset. Osa tutkimuksista tehtiin myös varmistamiseksi, ettei virhelähteitä esiinny. Näitä olivat mm. rakeisuuden määritykset. Tässä kappaleessa on lyhyesti selostettu näiden tutkimusten tulokset. Tarkemmat tulokset näistä tutkimuksista on esitetty vuoden -96 tutkimusraportissa /11/.

7.2 Tehdyt mittaukset

Jäykkyysmoduulimääritykset:

Vuoden -96 koekappalemittausten yhteydessä tehtiin koekappaleille NAT (Nottingham Asphalt Tester) -laitteistolla koekappaleille jäykkyysmoduulimääritykset. Menetelmässä kappaletta kuormitetaan viidellä lyhytaikaisella vertikaalisella kuormituksella. Kappaleen pintaan sijoitetut anturit mittaavat kappaleeseen syntyviä jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulosten perusteella dielektrisyyden ja jäykkyysmoduulin välillä ei ole yhteyttä. Korrelaatiot jäivät mittaustulosten välillä heikoiksi.

Rakeisuusmääritykset:

Koekappaleista määritettiin vuoden -96 mittausten yhteydessä noin joka viidennestä näytteestä rakeisuus. Koekappaleet oli tarkoitettu valmistettavaksi suhteutuksen mukaiseen rakeisuuteen. Tutkituissa näytteissä ei esiintynyt merkittäviä poikkeamia suhteutuksen mukaisesta rakeisuudesta, joten koekappaleiden valmistus rakeisuuden osalta oli onnistunut.

Koelaattojen kasteleminen:

Koelaattamittausten yhteydessä veden vaikutusta mittaustuloksiin tutkittiin kastelemalla laatat. Dielektrisyysarvoja seurattiin kastelun jälkeen ajan funktiona. Dielektrisyysarvoja seurattiin sekä tutkalla että sondilla. Tulosten perusteella todettiin, että dielektrisyysarvo palautui alkuperäiselle tasolle jo 1,5 tunnin kuluttua kastelemisesta. Veden vaikutus tuloksiin vaatisi kuitenkin lisätutkimuksia havainnon varmistamiseksi.

Pinnan karkeuden mittaukset:

Vuoden -96 kenttätutkimusten yhteydessä tehtiin pinnan karkeuden ja dielektrisyyden välisiä tutkimuksia. Dielektrisyysä mitattiin sekä päällystetutkalla että dielektrisyyssondilla. Pinnan karkeuden mittaamiseen käytettiin menetelmänä Sand Patch -menetelmää. Tulosten perusteella voitiin todeta ettei tutkamittausten tuloksilla ole yhteyttä pinnan karkeuteen. Sen sijaan sonditulosten korrelaatio oli keskinertainen. Sondilla mittaus on kuitenkin pistemäinen, joten tulokset ovat hyvin suppealta alalta. Sondin käyttö pinnan karkeuden määrittämiseen ei siis tämän tutkimuksen perusteella ole järkevää.

Tiivistämisen vaikutus dielektrisyyteen:

Kenttätutkimuksissa selvitettiin yhdellä kohteella tiivistämisen vaikutusta dielektrisyyteen. Mittaukset tehtiin liittymien kohdilla, jolloin voitiin päällystetä ajaa jyrän kulkemisen jälkeen päällysteen päälle ja mitata dielektrisyys. Mittauksia tehtiin myös sondilla, kun tähän oli mahdollisuus. Tulosten perusteella voitiin havaita, että dielektrisyys kasvoi tiivistämisen vaikutuksesta hyvin nopeasti tasolle, jolle se lopullisesti jäi. Mittauskohteita oli kuitenkin vähän ja tulokset suppeat. Mahdollisuus tiivistämisen ohjaukseen vaatisi lisätutkimuksia.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laboratoriotulosten perusteella voidaan todeta tyhjätilan ja dielektrisyiden välinen teoria oikeaksi ja toimivaksi. Selitysaste koekappale- ja koelaattamittauksissa on vahva dielektrisyiden ja tyhjätilan välillä. Lisäksi laboratoriotulosten perusteella nähdään, etteivät normaalit (alle 0,5 prosenttiyksikön) sideainepitoisuuden vaihtelut päällysteessä vaikuta merkittävästi päällysteen dielektrisyysarvoon. Tämä johtuu siitä, että bitumin dielektrisyysarvo (noin 2,8) on lähellä päällysteen dielektrisyttä. Lisäksi jatkok tutkimuksen laboratoriotulosten perusteella nähdään, että kiviaineksen dielektrisyys määrää päällysteen keskimääräisen dielektrisyystason. Kuitenkin erilaiset dielektriset ominaisuudet omaavista kiviaineksista valmistetut päällysteet voidaan korjauskerrointa käyttämällä sovittaa keskimääräiselle laboratoriokokeisiin perustuvalle käyrälle. Tätä yhtälöä voidaan käyttää hyväksi kenttämittauksissa tyhjätilojen laskennassa.

Kenttämittausten perusteella voidaan todeta, että päällystetutka soveltuu sekä tyhjätilamäärityksiin että päällysteen paksuuden määrittämiseen. Korrelaatiot tutkalla mitattaessa poranäytetulosten kanssa ovat vahvoja sekä tyhjätila- että paksuusmäärityksissä. Keskvirhe on tyhjätilamittauksissa 0,9 prosenttiyksikköä ja paksuusmittauksissa sitomattomalla alustalla 4 millimetriä ja sidotulla alustalla myös 4 millimetriä. Sen sijaan tutkalla mitatuilla tyhjätila-arvoilla ja DOR-tulosten mukaisilla tyhjätila-arvoilla ei ollut korrelaatiota, mihin ei tutkimuksessa löytynyt yksiselitteistä syytä.

Etuna tutkimuksissa poranäytteisiin verrattuna on, että tutkatuloksissa on mukana tuhansia mittaustuloksia, kun poranäytteitä yhdestä kohteesta on tässä tutkimuksessa kymmenen. Tutkatulosten kattavuus on siis paljon suurempi. Näin tien laadusta saadaan parempi käsitys kuin pelkästään poranäytteiden avulla. Myös ongelmakohtien kartoittaminen tutkatulosten avulla on nopeaa.

Mittausmenetelmää varten täytyy valmistaa menetelmäohjeet. Ehdotus menetelmäohjeeksi on esitetty *liitteellä 8*. Ohjeissa on myös lyhyesti selitetty laitteiston ja menetelmän teoriaa. Ylitys- ja alitusprosenttien laskemiseksi on esitetty oheessa kaava (kts. liite 8), joka painottaa ylityksen tai alituksen suuruutta prosentteja laskettaessa.

Mittauksissa on muutamia rajoittavia tekijöitä. Vesisateella ja tien pinnan ollessa märkä ei mittauksia voida tehdä. Syitä on kaksi. Ensinnäkin laitteisto eivät ole vesitiiviitä, vaan kastuminen saattaa aiheuttaa oikosulun ja rikkoa laitteiston. Toiseksi selvästi märkä tien pinta nostaa dielektrisyysarvoja normaalista vääristäen näin tuloksia.

Paksuusmittauksissa uuden ja vanhan päällysteen raja ei aina erotu. Ongelmia aiheuttaa esimerkiksi jyrskitty alusta. Rajapinta ei erotu myöskään, jos uuden kulutuskerroksen alusta on tasattu samalla massalla, jota käytetään kulutuskerroksessa. Tällöin rajapinta näkyy vasta tasauskerroksen pohjasta. Yleensäkin jos uuden ja vanhan päällysteen dielektriset ominaisuudet ovat lähellä toisiaan, niin rajapinnan näkyminen tutkatatassa on epävarmaa.

Käytetyn laitteiston tulee täyttää päällystetutkan laatuvaatimukset. Nämä tutkimukset on tehty 1 GHz:n antennilla, joten tuloksia ei voida suoraan käyttää hyväksi esimerkiksi 2,5 GHz:n antennin mittauksissa. Laitteiston toimivuus täytyy tarkistaa määräajoin esimerkiksi paksun kumilevyn avulla. Kumilevyn dielektrisyys pysyy vakiona ja se on etukäteen tunnettu. Näin voidaan varmistaa laitteiston toimivuus. Myös korkeuskorjaustiedoston toimivuus täytyy tarkistaa erilaisilla heilutustesteillä.

Sondimittausten tyhjätilatulokset kenttämittauksissa jäivät korrelaatioltaan poranäytteitten kanssa keskinkertaiselle tasolle, joten sondia voidaan käyttää tyhjätilamittauksiin korkeintaan suuntaa-antavana. Sondin ongelmana on sen reagoiminen pinnan karkeuteen. Mittauksen ollessa pistemäinen pinnan karkeuden vaikutus mittaustulokseen saattaa olla merkittävä ja tyhjätila-arvoja vääristävä.

9 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää päällystetutkan käyttömahdollisuuksia uusien päällysteiden laadunvalvonnassa. Tutkimukset tehtiin vuosina 1996-1997. Erityisesti keskityttiin päällysteen tyhjätilan ja dielektrisyysyden väliseen yhteyteen. Lisäksi tutkittiin päällystetutkalla määritettyjen paksuuksien tarkkuutta kenttämittausten avulla.

Dielektrisyys on materiaalin yksi sähköinen ominaisuus, joka on materiaalille ominainen vakio ja dimensioton suure. Tyhjätilan ja dielektrisyysyden välinen yhteys perustuu siihen, että jokaisella päällysteen komponentilla, ilmalla, bitumilla ja kiviaineksella, on oma dielektrisyysarvo. Päällysteen dielektrisyysarvo on puolestaan näiden komponenttien dielektrisyysien funktio. Tiivistettäessä päällystettä ilman suhteellinen osuus päällysteessä pienenee, jolloin päällysteen dielektrisyys puolestaan kasvaa. Tämä johtuu siitä, että ilman dielektrisyysarvo yksi on selvästi pienempi kuin bitumin (2,6-2,8) ja kiviaineksen (4,5-6,5) dielektrisyys.

Tutkimuksessa tehtiin lukuisa määrä sekä laboratorio- että kenttätutkimuksia. Laboratoriotutkimuksissa tutkimuksissa tehtiin sekä koekappale- että koelaattamittauksia, joissa keskityttiin tyhjätilan ja dielektrisyysyden välisen teorian toimivuuden selvittämiseen. Laboratoriotutkimuksissa dielektrisyysmittaukset tehtiin lähinnä dielektrisyyssondilla. Sondilla mittaus perustuu kapasitanssin muutoksiin tutkittavassa materiaalissa. Koelaattamittauksissa mittauksissa käytettiin myös päällystetutkaa, joka oli pääasiallinen mittausväline kenttätutkimuksissa. Päällystetutkana käytettiin SIR 10H -laitteistoa ja 1 GHz:n kartiotorviantennia. Päällystetutkalla dielektrisyysien määrittämiseen käytettiin heijastustekniikkaa, jossa dielektrisyys lasketaan rajapinnoista tapahtuvien heijastusten amplitudien suuruuksien perusteella. Mittaukset voidaan tehdä päällystetutkalla 50-70 km/h nopeudella ja yksi mittaus kattaa noin 300 x 300 mm² kokoisen alueen. Yleensä tallennetaan kaksi mittaustulosta metriä kohden.

Laboratoriotutkimuksissa valmistettiin koekappaleita molempina tutkimusvuosina. Vuoden -96 koekappaleista tutkittiin niiden dielektrisyys sondilla sekä tyhjätilat ja sideainepitoisuudet normaaleilla laboratoriomenetelmillä. Vuoden -97 koekappaleista ei tutkittu sideainepitoisuuksia, muuten tehtiin samat tutkimukset kuin edellisen vuoden koekappaleille. Lisäksi vuonna -96 tehtiin koelaattoja, joiden dielektrisyys mitattiin sekä sondilla että päällystetutkalla. Koelaattojen tyhjätilat selvitettiin poranäytteiden avulla.

Laboratoriotutkimusten perusteella voitiin todeta, että dielektrisyysyden ja tyhjätilan välillä on selvä riippuvuus. Korrelaatiot olivat vahvoja sekä koekappale- että koelaattamittauksissa. Poikkeuksen tuloksiin muodosti koelaattamittauksissa dielektrisyyssondilla mitattaessa SMA-laatat, joilla korrelaatio jäi heikoksi. Tämä johtui SMA:lle tyypillisestä pinnan karkeudesta, jonka todettiin vaikuttavan selvästi dielektrisyyssondin tuloksiin. Lisäksi koekappalemittausten perusteella voitiin todeta, että normaalit (alle $\pm 0,5$ prosentin) sideainepitoisuuden vaihtelut eivät vaikuta päällysteen dielektrisyysyteen, vaan päällysteen dielektrisyysyden vaihtelut voidaan selittää pelkästään tyhjätila- vaihteluiden avulla.

Kenttämittauksissa tyhjätilamääryksiä tehtiin molempina vuosina. Kenttämittausten dielektrisyysarvot muunnettiin tyhjätila-arvoiksi laboratoriossa määritetyn keskimääräisen yhtälön avulla. Tyhjätilojen laskentaa varten tarvitaan 1-2 poranäytettä työkohteesta. Poranäytteet otetaan ohjatusti kohdista, joiden dielektrisyys vastaa koko kohteen keskimääräistä dielektrisyttä. Poranäytteiden tyhjätilojen ja dielektrisyyksien avulla lasketaan korjauskerroin, jota käytetään mitattujen dielektrisyyksien korjaamiseen yhtälöön sopivaksi. Korjauskerrointa tarvitaan mm. siksi, että kiviaineksen dielektrisyys vaihtelee käytetyn murskeen mukaan. Toisaalta että käytettävä yhtälö on määritetty sondimittausten perusteella, joten tutkalla mitatut dielektrisyysarvot ovat hieman eri tasolla mittaustekniikan erilaisuuden takia.

Kenttämittauksissa päällystetutkalla ja dielektrisyyssondilla määritettyjä tyhjätila-arvoja verrattiin kohteista porattuihin poranäytteisiin. Päällystetutkatulosten ja poranäytteiden välinen korrelaatio oli vahva. Tulosten perusteella voitiin päätellä päällystetutkan soveltuvan uuden päällysteen tyhjätilamäärytyksiin. Sonditulosten ja poranäytetulosten välinen korrelaatio jäi keskinkertaiseksi, joten sondia ei tule käyttää kuin korkeintaan tyhjätilamittauksissa ohjaavaan laadunvalvontaan.

Päällysteen paksuusmittauksia päällystetutkalla on maailmalla tehty jo vuosia. Tutkimuksessa keskityttiin lähinnä menetelmän toimivuuden tarkastamiseen. Mittauksia tehtiin lähinnä vuonna -97. Vertailuksi tutkatuloksille mitattiin poranäytteiden keskimääräinen paksuus. Tulosten perusteella voitiin todeta päällystetutkan soveltuvan hyvin päällysteen paksuuden mittaamiseen. Korrelaatiot olivat vahvoja sekä sitomattomilla että sidotuilla alustoilla.

Mittauksissa tuli esiin joitakin mittauksia rajoittavia tekijöitä. Vesisateella tai tien pinnan ollessa märkä ei mittauksia voida tehdä. Sade saattaa rikkoa laitteiston ja tien märkyys voi vaikuttaa mittaustuloksiin. Lisäksi paksuusmittauksissa uuden päällysteen ja vanhan päällysteen rajapinta ei aina erotu, jolloin paksuusmäärytystä ei voida tehdä. Tällaista saattaa esiintyä esimerkiksi jyrksillä alustalla.

Päällystetutkan selvä etu muihin laadunvalvontamenetelmiin verrattuna on tulosten kattavuus. Päällystetutkalla mitattaessa saadaan koko kohteesta tulokset 0,5 metrin välein, joten tulosten kattavuus on erittäin hyvä. Mittaukset tehdään 50-70 km/h nopeudella, joten mittaus voidaan tehdä häiritsemättä merkittävästi muuta liikennettä. Lisäksi mittauksen nopeus mahdollistaa useamman linjan mittaamisen kustannusten kohoamatta kohtuuttomasti. Samalla mittauksella saadaan myös tarvittavat tiedot sekä tyhjätila- että paksuusmääryksiä varten ja erilaisia rekistereitä varten. Lisäksi koska mittaukset ovat koko kohteesta ei tilastomatemattisia laskelmia tarvitse tehdä. Ylitykset ja alitukset saadaan suoraan tuloksista metreinä, joten tuloksista voidaan laskea painotut ylitys- ja alitusprosentit työkohteelle tarkasti.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Aurinko H., DOR -menetelmän käyttö asfalttipäällysteiden tiiviiden määrittämisessä. Tielaitos, Kehittämiskeskus. Tielaitoksen selvityksiä. Helsinki 1994.
- /2/ Asfalttinormit 1995. Päällystealan neuvottelukunta ry. Helsinki 1995.
- /3/ Attoh-Okine B., Maser K., Roddis W.M.K., Evaluation of Automated Pavement Thickness Profiling Using Radar. The Kansas Transportation Research and New Developments Program K-Tran, Project Number KU-91-3. University of Kansas. Lawrence, Kansas 1992.
- /4/ Campbell J.E., Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at One to Fifty Megahertz. Soil. Sci. Soc. Am. J. 54. s. 332-341. 1990.
- /5/ Chen Y., Lau C.L., Scullion T., Implementation of the Texas Ground Penetrating Radar System. Research Report 1233-1. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System. College Station, Texas 1992.
- /6/ Fellner-Feldegg H., The Measurement of Dielectrics in the Time Domain. The Journal of Physical Chemistry 73 (3). 1969. s. 616-623.
- /7/ Kujala K., Factors Affecting Frost Susceptibility and Heaving Pressure in Soils. Acta Univ. Oul. C 58. 1991.
- /8/ Maser K., Scullion T., Use of Radar Technology for Pavement Layer Evaluation. Research Report 930-5F. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System. College Station, Texas 1991.
- /9/ PANK-menetelmät, kansio. Päällystealan neuvottelukunta ry. 1996.
- /10/ Plakk T., HF Permittivity Measurements by Capacitive Probe. Julkaisematon artikkeli. 1994.
- /11/ Roimela P., Päällystetutkan käyttö päällysteiden laadunvalvonnassa. Diplomityö. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto. Oulu 1997.
- /12/ Saarenketo T., Maatutkan ja dielektrisyyssondin käyttö päällysteen tyhjätilan ja/tai bitumipitoisuuden mittauksissa. Aloite 31.3.1996. Tielaitos, Lapin tiepiiri. Rovaniemi 1996.
- /13/ Saarenketo T., Routa ja maatutka. Routa ja tierakennus, Tornio, 14.-15.11.1995.
- /14/ Saarenketo T., Using Ground Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control. Paper Submitted for Presentation and Publication at the 1997 Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C. 1996.

LIITTEET

1. Vuoden -96 koekappalemittausten tulokset
2. Vuoden -97 koekappalemittausten tulokset
3. Esimerkkikuvia dielektrisyysien jatkuvista profiileista Mt 78:ltä
Pudasjärveltä
4. Kenttämittausten pistekohteiden dielektrisyysarvot
5. Kenttämittausten pistekohteiden tyhjätilat ja paksuudet
6. Seurantakohteen (Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi) dielektrisyysien profiilit
7. Tyhjätila-arvojen vertailut kohteittain
8. Ehdotus päällystetutkamittausten tyhjätila- ja paksuusmäärittysten
menetelmäohjeeksi

Vuoden -96 koekappalemittausten tulokset

AB 16 Latostenmaa (Pt 11427 Hongisoja)			
tunnus	tyhjättila (%)	sideainepitoisuus (%)	dielektrisyysarvo
111.1	1.3	5.6	4.3
111.2	1.3	5.6	4.3
111.3	1.2	5.6	4.0
112.1	0.7	5.4	4.9
112.2	0.7	5.6	4.8
112.3	0.6	5.5	4.7
113.1	0.5	-	4.9
113.2	0.7	-	5.0
113.3	0.5	5.5	4.9
121.1	1.2	5.5	4.4
121.2	1.1	5.6	4.5
121.3	1.4	5.6	4.2
122.1	0.5	5.6	4.4
122.2	0.3	5.7	4.4
122.3	0.7	5.6	4.6
123.1	0.6	5.2	4.8
123.2	0.4	5.4	4.8
123.3	0.3	5.3	4.7
131.1	2.0	4.9	4.1
131.2	2.1	5.3	4.1
131.3	1.7	5.3	4.3
132.1	1.0	5.2	4.7
132.2	0.9	5.0	4.3
132.3	0.8	5.2	4.5
133.1	0.6	5.0	4.9
133.2	0.6	5.2	4.8
133.3	0.3	5.3	5.0

SMA 18 Koskenkylä (Vt 1 Turun moottoritie)			
tunnus	tyhjättila (%)	sideainepitoisuus (%)	dielektrisyysarvo
211.1	4.6	6.1	3.5
211.2	3.7	6.3	3.4
211.3	2.8	6.3	3.4
212.1	5.3	5.8	3.4
212.2	2.7	6.4	3.2
212.3	6.4	5.2	2.9
213.1	4.3	6.0	3.7
213.2	1.6	6.5	3.7
213.3	2.1	6.8	3.5
221.1	4.0	6.5	3.7
221.2	4.3	6.5	3.1
221.3	5.1	5.3	3.1
222.1	3.9	6.2	3.3
222.2	4.0	6.8	3.6
222.3	3.6	6.6	3.2
223.1	3.1	6.2	3.8
223.2	3.3	6.4	3.3
223.3	3.7	6.1	3.6
231.1	3.8	6.7	3.0
231.2	2.4	7.0	3.0
231.3	4.6	6.7	3.4
232.1	4.9	6.2	3.3
232.2	1.7	7.2	3.4
232.3	4.3	6.5	3.3
233.1	3.4	6.6	3.5
233.2	1.7	7.0	3.7
233.3	1.9	7.0	3.9

Vuoden -96 koekappalemittausten tulokset

AB 16 Vaiskokuru (Vt 4 Korvala-Raudanjoki)			
tunnus	tyhjätila (%)	sideainepitoisuus (%)	dielektrisyysarvo
311.1	4.6	5.5	3.8
311.2	4.7	5.2	3.7
311.3	4.7	5.5	3.8
312.1	2.8	5.2	3.6
312.2	2.8	5.6	3.8
312.3	2.6	5.1	3.5
313.1	2.1	5.1	4.0
313.2	1.4	5.3	3.9
313.3	2.2	5.1	4.0
321.1	4.9	5.0	3.6
321.2	4.5	5.3	3.5
321.3	4.0	5.5	3.6
322.1	3.1	5.4	3.4
322.2	2.3	5.5	3.7
322.3	2.0	5.7	3.6
323.1	1.1	5.6	3.7
323.2	1.1	5.4	3.9
323.3	0.8	5.8	4.3
331.1	2.7	6.0	3.7
331.2	2.7	5.9	3.7
331.3	2.7	5.7	3.5
332.1	1.2	6.3	3.9
332.2	0.6	5.7	4.1
332.3	0.9	6.1	3.9
333.1	0.8	5.7	4.0
333.2	0.4	5.8	4.3
333.3	0.3	6.3	4.4

AB 25 Kuusajärvi (Vt 21 Kangosjoki-Muonio)			
tunnus	tyhjätila (%)	sideainepitoisuus (%)	dielektrisyysarvo
411.1	3.7	5.2	3.6
411.2	5.1	4.7	3.3
411.3	4.4	4.8	3.4
412.1	3.9	4.5	3.6
412.2	1.6	5.1	3.7
412.3	2.7	4.9	3.6
413.1	0.9	4.6	4.3
413.2	1.1	4.6	4.1
413.3	1.0	4.6	3.8
421.1	4.1	5.2	3.6
421.2	4.1	5.1	3.6
421.3	3.8	5.3	3.5
422.1	4.2	4.8	3.4
422.2	0.9	5.4	4.2
422.3	2.1	5.1	3.6
423.1	0.9	5.0	4.4
423.2	1.2	4.7	3.9
423.3	1.4	4.7	3.7
431.1	1.4	5.8	3.9
431.2	2.8	5.6	3.4
431.3	2.8	5.6	3.5
432.1	2.2	5.5	3.9
432.2	2.1	5.4	3.6
432.3	1.4	5.6	4.0
433.1	1.3	5.1	4.0
433.2	0.9	5.1	4.3
433.3	2.8	5.2	3.7

Vuoden -97 koekappalemittausten tulokset

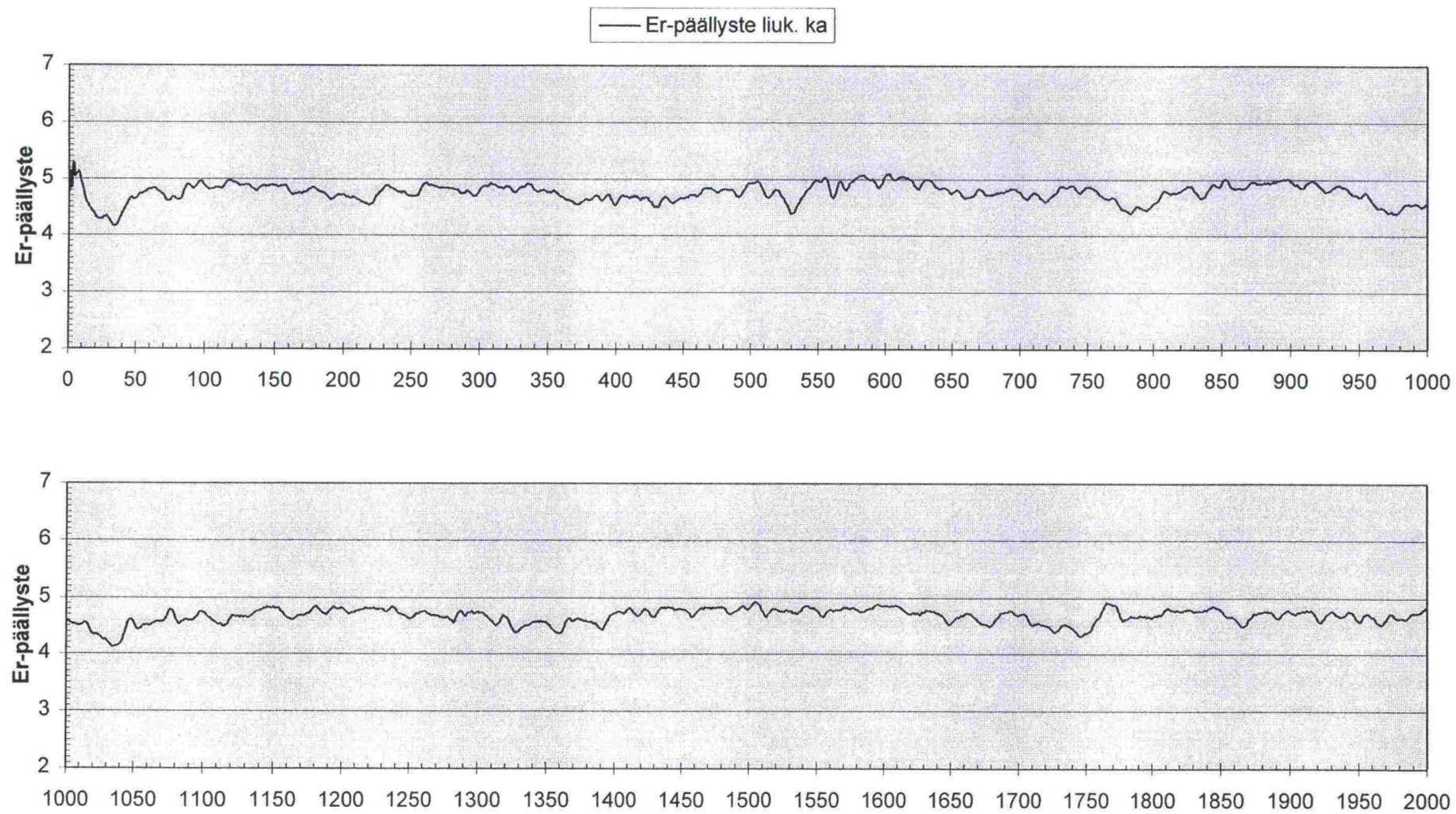
AB 16 Vaiskokuru (Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi)		
tunnus	dielektrisyysarvo	tyhjättila (%)
1	3.3	5.8
2	3.5	5.1
3	3.6	5.7
4	4.0	5.6
5	3.6	4.3
6	3.9	4.5
7	4.0	4.1
8	3.9	3.9
9	4.0	3.0
10	4.1	2.9
11	4.2	2.6
12	4.5	2.2

SMA 18 Koskenkylä (Mt 45 Helsinki-Noppo)		
tunnus	dielektrisyysarvo	tyhjättila (%)
1	3.2	5.7
2	3.4	4.2
3	3.7	4.3
4	4.0	3.1
5	3.9	2.8
6	4.0	2.4
7	3.8	2.5
8	3.9	3.3
9	3.9	3.5
10	3.7	2.2
11	3.8	2.8
12	3.7	3.1

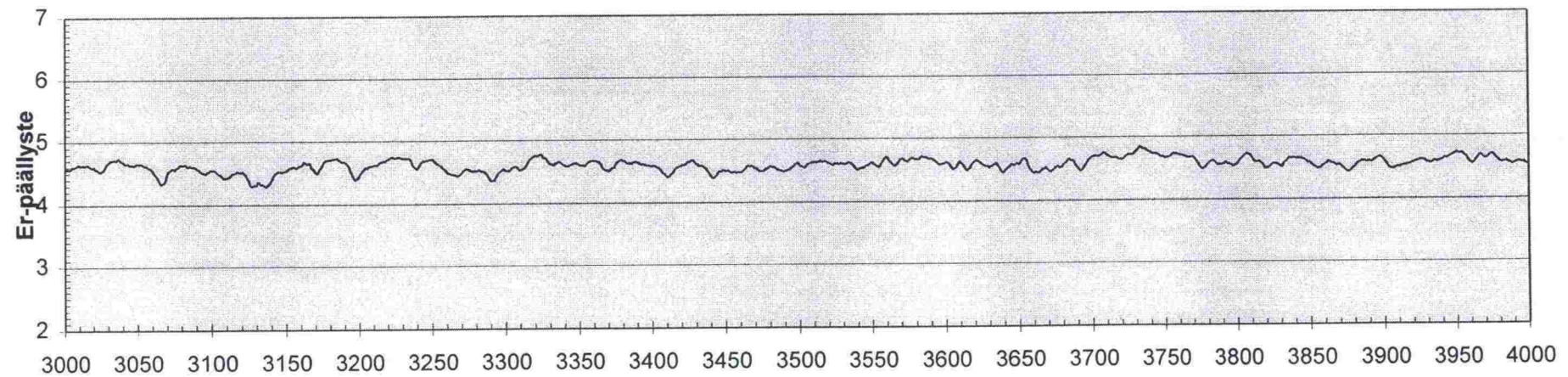
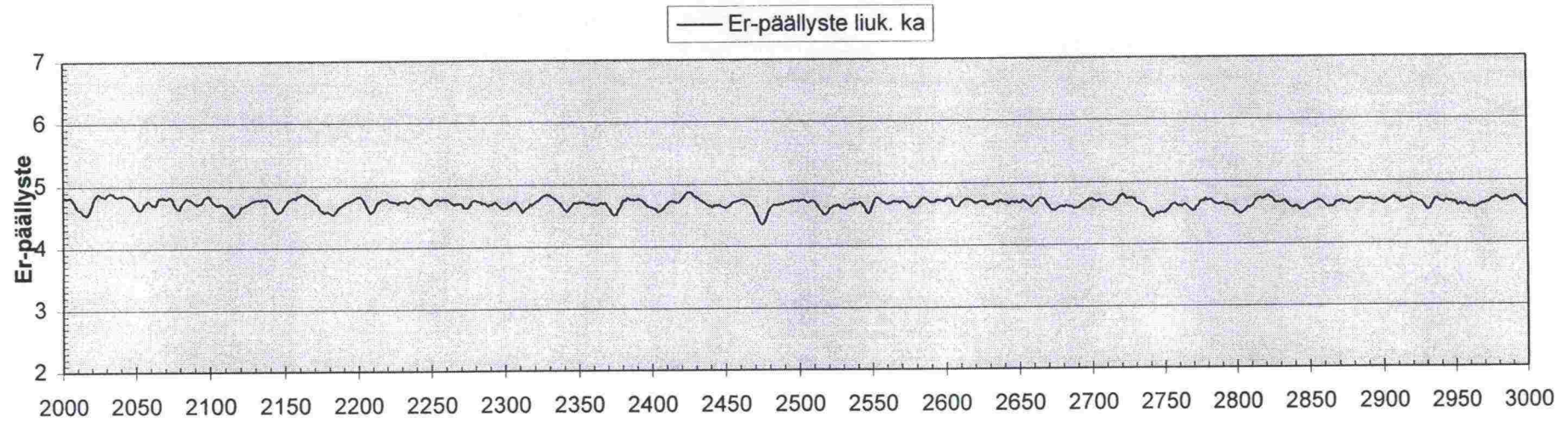
AB 16 Lohisarvio (Vt 4 Vuotso)		
tunnus	dielektrisyysarvo	tyhjättila (%)
1	4.1	6.2
2	4.4	4.2
3	4.4	3.5
4	4.5	3.2
5	4.5	3.3
6	4.5	3.0
7	4.4	3.0
8	4.7	2.0
9	4.5	3.3
10	4.4	3.4
11	4.6	3.4
12	4.6	2.6

AB 16 Palovaara, emulsio (Mt 78 Pudasjärvi)		
tunnus	dielektrisyysarvo	tyhjättila (%)
1	3.7	8.5
2	3.8	8.8
3	3.9	6.5
4	4.2	8.8
5	4.2	7.5
6	4.0	6.8
7	4.1	7.9
8	4.5	6.1
9	4.4	6.1
10	4.6	6.4
11	4.7	6.5
12	4.7	5.7

Esimerkki dielektrisyyksien jatkuvasta profiilista, Mt 78 Pudasjärvi, plv 0-4000 m



Esimerkki dielektrisyyksien jatkuvasta profiilista, Mt 78 Pudasjärvi, plv 0-4000 m



Kenttämittausten pistekohtaiset dielektrisyysarvot

Vt 1 Turun moottoritie			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
10	4.12	4.51	
32	4.48	4.60	
52	4.11	4.36	
78	4.31	4.56	
104	4.20	4.34	
205	4.38	4.57	
323	4.60	4.53	
603	4.43	4.58	
921	4.68	4.74	
1220	4.48	4.83	

Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
198	4.27	4.16	3.8
695	4.25	4.19	3.8
2030	4.20	4.18	3.9
2210	4.21	4.17	3.9
3085	4.06	4.12	4.2
4251	4.04	4.16	3.7
5392	4.16	4.19	3.5
5811	4.14	4.17	3.6
5923	4.20	4.22	3.7
6855	4.22	4.24	3.7

Vt 4 Korvala-Raudanjoki			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
2060	4.71	4.67	4.2
4659	4.34	-	3.6
5299	4.33	-	3.7
5657	4.40	-	3.4
7800	4.09	4.64	3.8
8460	4.37	4.63	3.9
9020	3.87	4.45	4.1
12750	4.14	4.43	3.8
13745	3.90	4.52	3.8
14690	4.12	4.51	4.0
17700	3.98	4.57	4.1
17850	4.15	4.51	4.3

Vt 4 Vuotso			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
470	4.22	4.40	4.5
1095	4.12	4.22	4.4
1985	4.03	4.25	4.1
2340	4.01	4.31	4.3
3150	4.37	4.44	5.0
3515	4.48	4.67	4.2
4215	4.18	4.34	4.9
4920	4.08	4.41	4.4
5325	4.06	4.24	4.7
5760	3.89	4.32	4.0

Kenttämittausten pistekohtaiset dielektrisyysarvot

Vt 21 Kangosjoki-Muonio			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
108	4.59	4.22	4.1
297	4.77	4.09	3.4
347	4.53	4.07	4.2
434	3.95	3.85	3.7
1446	4.07	3.79	3.5
2140	4.53	4.12	3.5
3504	4.49	4.15	3.1
5270	4.49	4.02	3.7
6126	4.02	3.78	3.0
6266	4.47	4.08	3.6

Mt 78 Törrönkoski-Alalivo			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
1145	4.84	5.27	
1400	4.71	5.22	
2370	4.53	4.78	
3125	4.25	4.90	
3780	4.62	5.00	
4900	4.43	4.92	
5345	4.84	5.36	
6705	4.72	5.31	
7435	4.43	5.00	
7985	4.61	5.16	

Mt 45 Helsinki-Noppo			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
108	4.48	4.79	3.8
200	4.30	4.56	3.6
246	4.42	4.77	3.6
332	4.03	4.24	3.4
434	3.87	4.14	3.2
543	3.80	3.99	3.6
683	3.97	4.27	3.5
759	3.89	4.27	3.5
838	4.15	4.26	3.7
989	4.16	4.75	4.0

Mt 9262 Anterovaara-Härkönen			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
1497	3.88		
1946	3.70		
2315	3.54		
2764	3.43		
3153	3.31		
3392	3.02		
3682	2.94		
4390	3.20		
4590	3.68		
4839	3.27		

Kenttämittausten pistekohtaiset dielektrisyysarvot

Pt 11427 Hongisoja			
paalu	dielektrisyysarvo tutka, 3 m ka	dielektrisyysarvo Static Shot	dielektrisyysarvo sondi
245	4.36	4.69	4.1
285	4.34	4.74	4.6
376	4.19	4.60	4.5
1622	4.45	4.68	4.8
2408	4.38	4.91	4.9
2461	4.45	4.76	4.7
3550	4.33	4.58	5.0
3639	4.11	4.65	4.5
4351	4.09	4.75	4.7
4679	4.23	4.53	4.7

Kenttämittausten pistekohteiden tyhjättila- ja paksuusarvot

Vt 1 Turun moottoritie				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
10	5.9		4.9	
32	4.1		5.5	
52	5.8		5.2	
78	4.9		4.9	
104	5.4		5.2	
205	4.6		4.5	
323	3.8		4.6	
603	4.4		4.0	
921	3.4		5.5	
1220	4.1		1.9	

Vt 4 Korvala-Raudanjoki				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
10	1.4		1.9	
32	2.1		3.1	
52	2.1		3.6	
78	1.9		4.0	
104	2.8		2.0	
205	2.0		2.5	
323	3.5		3.5	
603	2.6		1.9	
921	3.4		2.3	
1220	2.6		2.1	
17700	3.1		2.3	
17850	2.6		3.1	

Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
198	3.4	96	4.1	95
695	3.5	85	3.3	85
2030	3.6	94	4.1	90
2210	3.6	94	3.8	92
3085	4.2	90	4.9	91
4251	4.3	93	5.0	94
5392	3.8	92	3.6	96
5811	3.9	90	4.4	87
5923	3.7	110	3.9	122
6855	3.6	99	3.3	101

Vt 4 Vuotso				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
10	3.7	49	3.8	48
32	3.9	48	3.8	40
52	4.6	32	3.9	30
78	4.8	35	3.7	35
104	3.2	50	3.1	48
205	2.8	69	2.9	65
323	4.0	51	4.1	42
603	4.2	48	3.9	48
921	4.3	46	3.1	39
17850	4.7	48	5.4	49

Kenttämittausten pistekohteiden tyhjättila- ja paksuusarvot

Vt 21 Kangosjoki-Muonio				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
108	1.12	65	2.00	65
297	0.91	61	1.50	58
347	1.20	58	1.50	55
434	2.40	47	1.50	55
1446	2.08	50	1.90	49
2140	1.20	61	0.90	59
3504	1.28	56	1.70	53
5270	1.27	58	1.40	60
6126	2.21	45	2.30	45
6266	1.29	59	1.10	64

Mt 45 Helsinki-Noppo				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
108	2.4	71	3.1	55
200	2.9	67	2.6	50
246	2.6	64	4.5	47
332	3.9	61	3.8	45
434	4.5	61	5.7	48
543	4.9	58	5.3	48
683	4.1	64	3.5	50
759	4.4	65	4.1	51
838	3.4	61	4.0	50
989	3.4	67	3.5	53

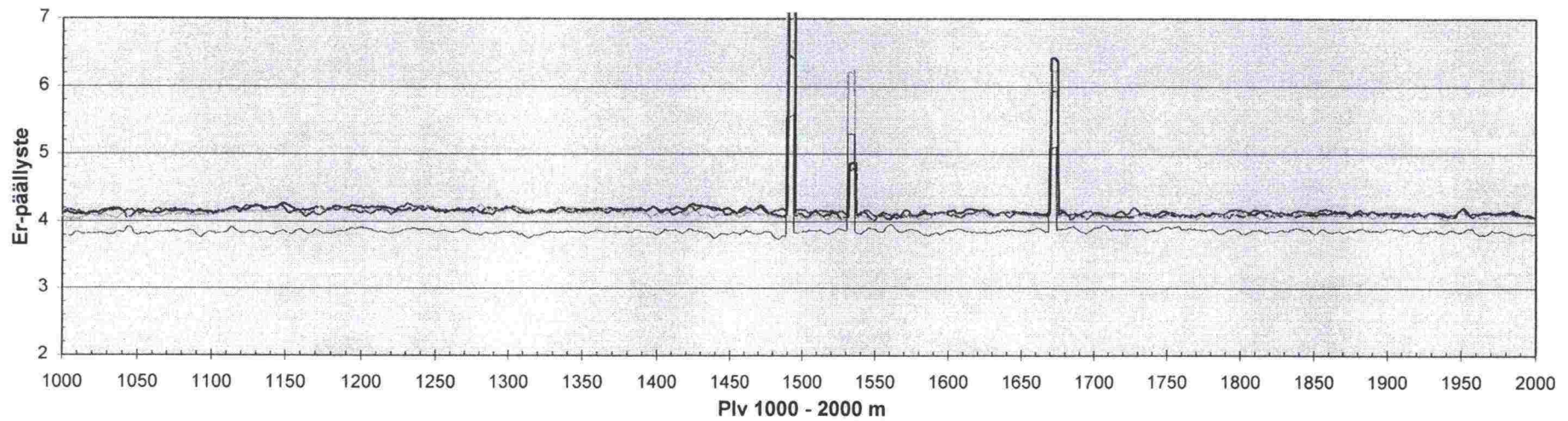
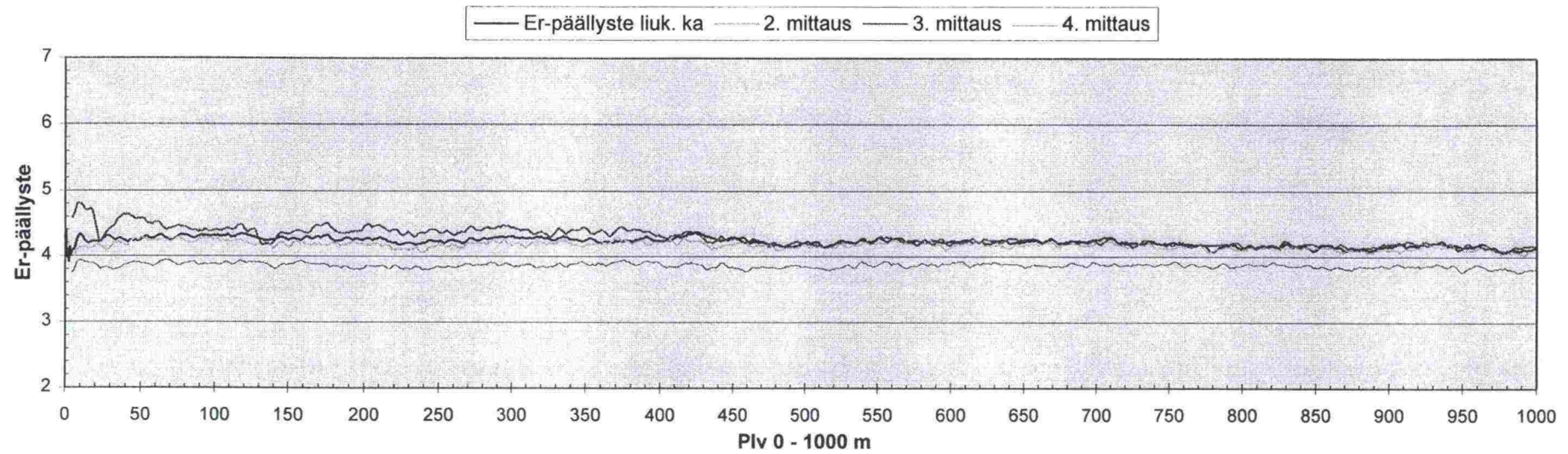
Mt 78 Törrönkoski-Alalivo				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
1145	5.6	62	6.4	54
1400	6.3	57	6.8	50
2370	7.2	58	7.6	52
3125	9.1	49	8.6	49
3780	6.7	52	7.4	50
4900	7.8	47	6.5	50
5345	5.6	68	4.9	58
6705	6.2	60	5.5	53
7435	7.8	47	6.4	42
7985	6.8	53	4.4	50

Mt 9262 Anterovaara-Härkönen				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
108	5.6	67	-	53
200	6.3	47	8.0	35
246	7.8	54	10.5	44
332	8.9	56	9.5	43
434	9.7	57	9.3	36
543	13.2	44	11.6	36
683	14.4	52	-	45
759	10.0	62	9.7	65
838	7.0	77	7.7	85
989	10.0	51	8.3	45

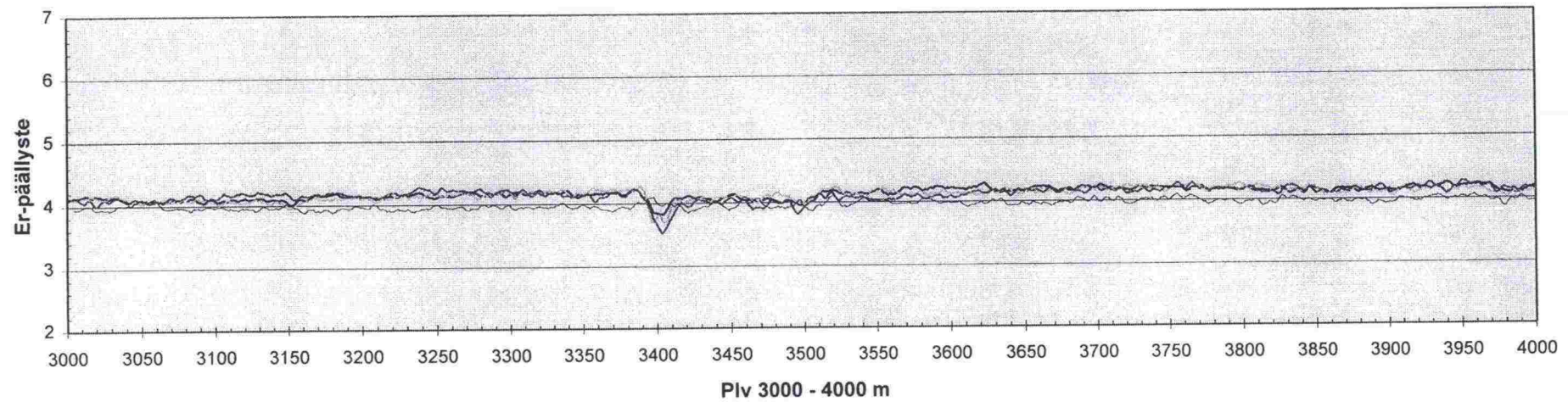
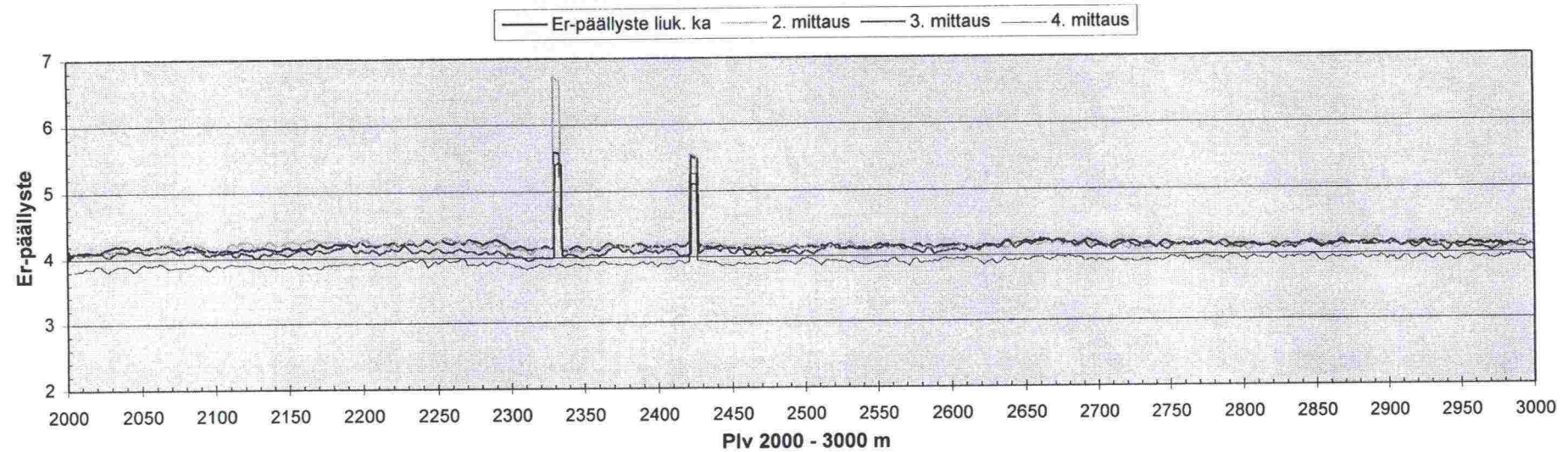
Kenttämittausten pistekohteiden tyhjättila- ja paksuusarvot

Pt 11427 Hongisoja				
paalu	tutkamittaus		poranäytteet	
	tyhjättila (%)	paksuus (mm)	tyhjättila (%)	paksuus (mm)
245	2.0		2.2	
285	2.1		1.7	
376	2.5		1.3	
1622	1.8		2.5	
2408	2.0		1.0	
2461	1.8		1.8	
3550	2.1		1.0	
3639	2.7		2.4	
4351	2.7		1.9	
4679	2.3		3.5	

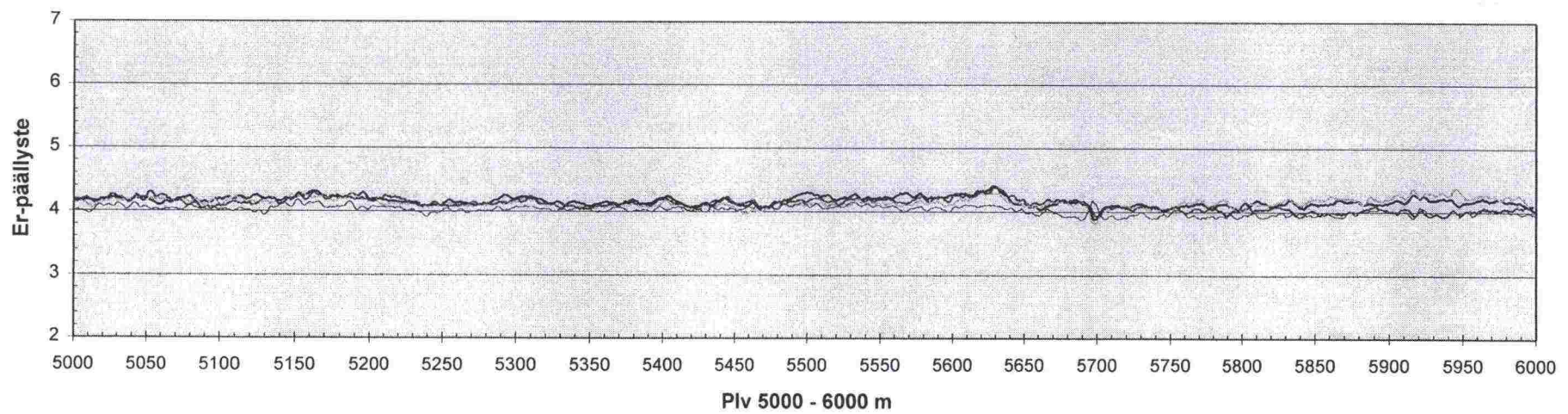
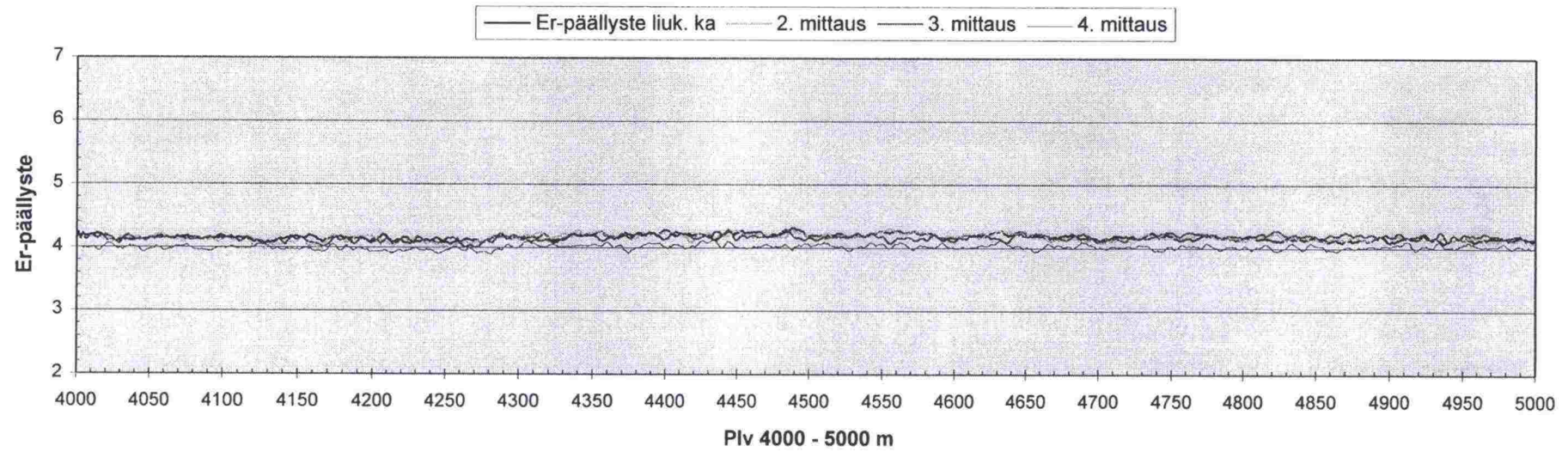
Seurantamittaukset, Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi



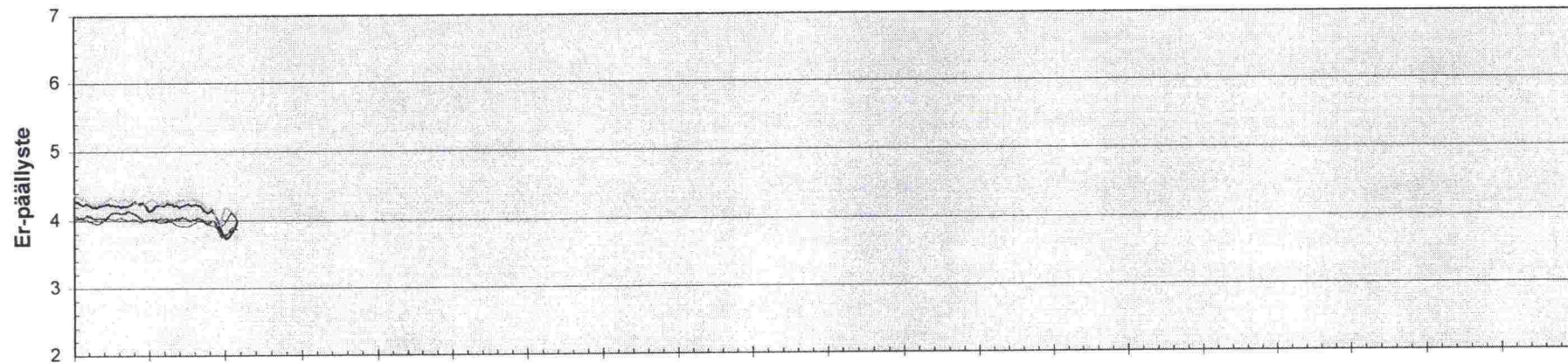
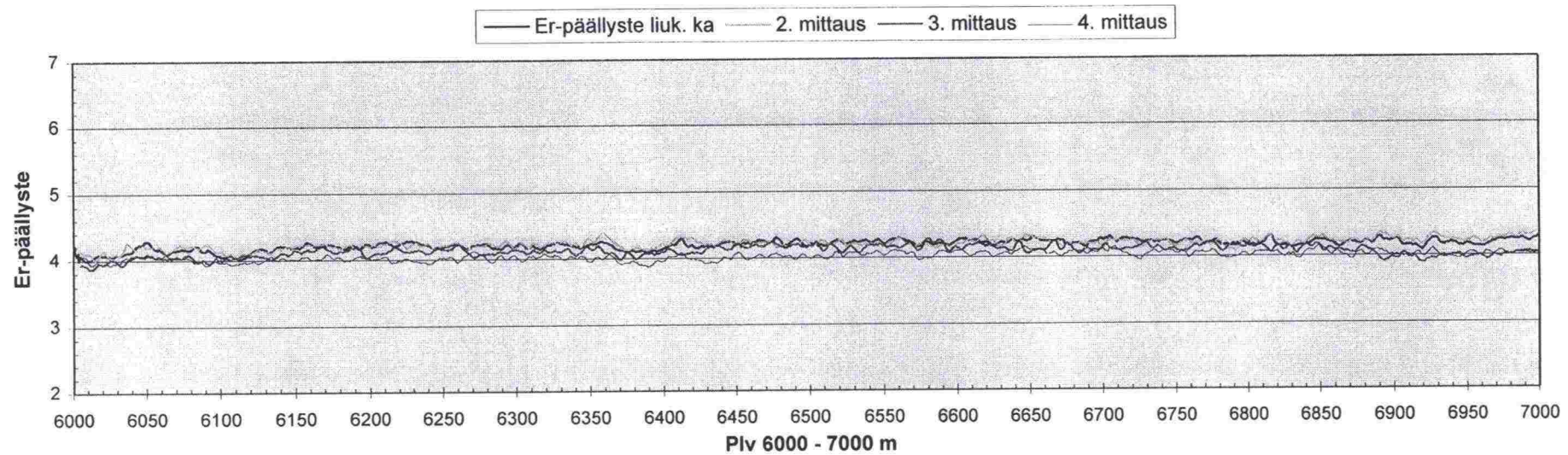
Seurantamittaukset, Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi



Seurantamittaukset, Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi



Seurantamittaukset, Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi



Poranäyte- ja päällystetutkatulosten vertailu

Vt 1 Turun moottoritie (-96), SMA 18		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	4.9	yhteensä 2800 näytettä
	5.5	
rajat:	5.2	
2.0-6.0 %	4.9	
	5.2	
	4.5	
	4.6	
	4.0	
	5.5	
	1.9	
keskiarvo	4.6	4.6
keskihajonta	1.1	1.0
ylitysprosentti	9.7	8.5
alitusprosentti	0.6	0.1

Mt 45 Helsinki-Noppo, SMA 18		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	2.6	yhteensä 4000 näytettä
	3.8	
rajat:	5.3	
2.0-6.0 %	3.5	
	4.1	
	3.1	
	4.5	
	5.7	
	4.0	
	3.5	
keskiarvo	4.0	3.4
keskihajonta	1.0	0.5
ylitysprosentti	2.3	0
alitusprosentti	1.8	0.3

Pt 11427 Hongisoja (-96), AB 16		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	2.2	yhteensä 9636 näytettä
	1.7	
rajat:	1.3	
1.0-5.0 %	2.5	
	1.0	
	1.8	
	1.0	
	2.4	
	1.9	
	3.5	
keskiarvo	1.9	2.4
keskihajonta	0.8	0.4
ylitysprosentti	0	0
alitusprosentti	21.2	0.1

Vt 4 Korvala-Raudanjoki (-96), AB 16		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	1.9	yhteensä 35880 näytettä
	3.1	
rajat:	3.6	
1.0-5.0 %	4.0	
	2.0	
	2.5	
	3.5	
	1.9	
	2.3	
	2.1	
	2.3	
	3.1	
keskiarvo	2.7	2.1
keskihajonta	0.7	0.3
ylitysprosentti	0.1	0
alitusprosentti	1.1	0.7

Poranäyte- ja päällystetutkatulosten vertailu

Vt 21 Kangosjoki-Muonio (-96), AB 25		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	2.0	yhteensä 16838 näytettä
	1.5	
rajat:	1.5	
1.0-6.0 %	1.5	
	1.9	
	0.9	
	1.7	
	1.4	
	2.3	
	1.1	
keskiarvo	1.6	1.2
keskihajonta	0.4	0.3
ylitysprosentti	0	0
alitusprosentti	8.1	19.4

Vt 4 Vuotso, AB 20		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	3.8	yhteensä 25066 näytettä
	3.8	
rajat:	3.9	
1.0-5.0 %	3.7	
	3.1	
	2.9	
	4.1	
	3.9	
	3.1	
	5.4	
keskiarvo	3.7	4.0
keskihajonta	0.7	0.6
ylitysprosentti	2.9	5.0
alitusprosentti	0	0

Vt 4 Raudanjoki-Vuojärvi, AB 16		
	poranäytteet	tutka
pisteiden tyhjätilat	4.1	yhteensä 14218 näytettä
	3.3	
rajat:	4.1	
1.0-5.0 %	3.8	
	4.9	
	5.0	
	3.6	
	4.4	
	3.9	
	3.3	
keskiarvo	4.0	3.8
keskihajonta	0.6	0.3
ylitysprosentti	4.5	0.3
alitusprosentti	0	0

**Tielaitos**

Lapin tiepiiri

Mittaus- ja maatumkimusyksikkö

Maatumtkaryhmä

Ehdotus menetelmäohjeeksi

PÄÄLLYSTEEN TYHJÄTILAN JA PAKSUUDEN MÄÄRITTÄMINEN PÄÄLLYSTETUTKALLA

Teoria: Menetelmässä tyhjätilan ja paksuuden määrittäminen perustuu materiaalin dielektrisyysvaihteluihin. Dielektrisyys on yksi materiaalin sähköisiä ominaisuuksia kuvaava suure. Sen suuruus riippuu materiaalin ominaisuuksien vaihteluista. Tyhjätilamäärittämisessä lähtökohdaksi on, että päällysteen dielektrisyys on päällysteen komponenttien funktio. Tiivistettäessä päällysteen tyhjätila pienenee, jolloin ilman osuus päällysteessä vähenee ja suuren dielektrisyysominaisuuksien omaavien bitumin ja kiviaineksen suhteellinen osuus kasvaa. Päällysteen dielektrisyys siis kasvaa tiivistyksen vaikutuksesta.

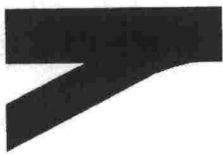
Dielektrisyysien laskennassa käytetään kartiotorvantennille hyvin soveltuva heijastustekniikka. Mittaus perustuu sähköisistä rajapinnoista tapahtuviin heijastuksiin. Antenni lähettää sähkömagneettisia pulsseja, joiden rajapinnoista tapahtuvat heijastukset rekisteröidään vastaanottavan antennin avulla. Mittaustuloksista tallennetaan kaksi mittausta metrille. Mittaustuloksena saadaan rajapinnoista tapahtuneiden heijastusamplitudien suuruudet ja pulssin kulkuaika rajapinnasta toiselle eli päällysteen pinnasta päällysteen pohjaan.

Laitteisto: Laitteistona käytetään maatumtkan laatuvaatimukset täyttävää maatumtkalustoa, joka on varustettu 1 GHz:n kartiotorvantennilla. Kokonaisuutta nimitetään tässä ohjeessa päällystetutkaksi.

Mittaus: Mittauksissa tallennetaan kaksi mittaustulosta metriä kohden. Mittausaikana käytetään 20 nanosekuntia. Suurin mittausnopeus on 50-60 km/h. Mittaus tehdään jatkuvana mittauksena kohteen alusta kohteen loppuun. Mittauslinjojen määrästä ja pituudesta sovitaan tilaajan kanssa erikseen. Mittausten kattavuuden kannalta olisi suositeltavaa, että mitataan kaikki päällystettyjen kaistojen molemmat ajourat. Samalla mittauksella saadaan tarvittavat tiedot sekä päällysteen tyhjätilan että paksuuden määrittämistä varten.

Tyhjätilan laskenta:

Tyhjätila-arvot lasketaan dielektrisyysien keskiarvoon perustuvalla menetelmällä. Menetelmässä käytetään hyväksi tutkimuksia, joissa on laboratoriokokeiden avulla määritetty funktio dielektrisyys ja tyhjätilan välille. Menetelmää varten porataan mittausten ja työmaalla tapahtuvan dielektrisyysien keskiarvon laskennan jälkeen kalibrointinäytteet työkohteesta 1-2:sta eri paikasta päällystetutkalla mitattua keskimääräistä dielektrisyysistä vastaavista pisteistä.

**Tielaitos**

Lapin tiepiiri

Mittaus- ja maatutkimusyksikkö

Maatutkaryhmä

Ehdotus menetelmäohjeeksi

PÄÄLLYSTEEN TYHJÄTILAN JA PAKSUUDEN MÄÄRITTÄMINEN PÄÄLLYSTETUTKALLA

Näytteenotto ohjataan siis dielektrisyyskäsien avulla oikeisiin kohtiin. Kalibrointinäytteiden avulla määritetään päällysteen tyhjätilojen laskemiseen tarvittava korjauskerroin.

Tulokset:

Tulokset esitetään jatkuvana profiilina (esim. Excel -kaavio) tai karttapohjalla (esim. T&M Map). Tarvittaessa voidaan tulostaa tulokset myös numeerisessa muodossa. Tulokset ilmoitetaan jokaiselta mittalinjalta erikseen. Pyynnöstä voidaan laskea eri linjojen tuloksista keskiarvo, joka ilmoitetaan yksittäisten mittauslinjojen tuloksien sijasta.

Tyhjätiloille lasketaan annetuille raja-arvoille painotetut ylitys- ja alitusprosentit. Painotettu keskiarvo z ylityksille/alituksille lasketaan kaavalla 1. Raja-arvoina käytetään Asfalttinormeissa esitettyjä raja-arvoja, tai tilaajan ja urakoitsijan erikseen sopimia raja-arvoja. Myös paksuudelle lasketaan painotettu alitusprosentti tilaajan antamalle raja-arvolle. Tarvittaessa voidaan esittää korjaamista vaativat, rajojen ulkopuolelle jäävät alueet yhden metrin tarkkuudella.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(1 + \left| \frac{x - x_i}{x} \right| \right) * y_i \right)}{s} * 100\%$$

missä: x on annettu raja-arvo
 x_i on mitattu raja-arvon ylittävä/alittava arvo
 y_i on x_i :tä vastaavan ylityksen/alituksen pituus metreinä
 s on koko mitatun kohteen pituus metreinä

Tarkkuus: Päällysteen tyhjätilamäärittysten keskivirhe on 0,9 prosenttiyksikköä ja paksuuden määrittysten keskivirhe sitomattomalla alustalla 4 mm ja sidotulla alustalla 4 mm.

Mittauksia rajoittavat tekijät:

Vesisateella tai tien pinnan ollessa märkä *ei voida* mitata. Mittauksia *ei voida* myöskään suorittaa maan ollessa jäässä.

Paksuusmäärittäyksissä rajapinta *ei aina erotu*, esimerkiksi jos uusi päällyste on tehty jyrksille tai ominaisuuksiltaan uutta päällystettä vastaavalle alustalle.

ISBN 951-726-407-0
ISSN 0788-3722